



UNIVERSITÉ  
LAVAL

---

Gestion optimisée de la ressource en eau en contexte de changements climatiques  
Le bassin du fleuve Artibonite (Haïti)

---

Réalisé par  
Etienne Guilpart  
Marc-André Bourgault, Amaury Tilmant

Dans le cadre projet FAO - SAGA  
Sécurité alimentaire : une agriculture adaptée

Département de génie civil et de génie des eaux  
Faculté des Sciences et de Génie  
Université Laval  
8 septembre 2021



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Changements climatiques dans le bassin de l'Artibonite</b>	<b>8</b>
1.1	Objectifs du chapitre et livrables	9
1.2	Changements climatiques : concepts et modélisation	9
1.2.1	Préambule	9
1.2.2	Climats passés, climats futurs	10
1.2.3	Les modèles climatiques	10
1.2.4	Des simulations climatiques aux scénarios climatiques	11
1.2.5	Constitution d'un ensemble climatique	11
1.3	Les changements climatiques dans le bassin de l'Artibonite : Méthodologie de l'activité climatique de l'étude	12
1.3.1	Sélection des données d'observations météorologiques et validation (AC-1 à AC-4)	12
1.3.2	Sélection des simulations climatiques et les processus de pré-traitements (AC-5 et AC-6)	14
1.3.3	Production des scénarios climatiques : La correction de biais (AC-7)	15
1.3.4	Mise en forme	16
1.4	Climatologie du bassin versant de l'Artibonite	16
1.4.1	Tendances climatiques passées	16
1.4.2	Tendances climatiques futures	20
1.4.3	Évolution des précipitations extrêmes	23
<b>A</b>	<b>Annexes</b>	<b>25</b>
A.1	Délimitation des entités hydrographiques et protocoles	26
A.1.1	Protocole de délimitation du bassin de l'Artibonite et de ses districts hydrographiques	26
A.2	Validation de l'ETP de ERA5-Land au pas de temps mensuel	29
A.2.1	Comparaison entre l'ETP de MEaSUREs-RM-OBS et de Herrera and Ault (2017)	29
A.2.2	Comparaison entre l'ETP de ERA5-Land et de Herrera and Ault (2017)	29
A.2.3	Conclusions des comparaisons	29
A.3	Exemples de codes pour l'extraction des données climatiques dans des fichiers "NetCDF"	31
A.3.1	Exemple de code sous <i>R</i>	31
A.3.2	Exemple de code sous <i>Python</i>	32

# Table des figures

1	Méthodologie générale du projet, divisée en trois activités (climatique, hydrologique et hydro-économique).	5
2	Limite du bassin versant de l'Artibonite et des treize districts hydrographiques.	7
1.1	Illustration de l'importance de disposer de longue séries temporelles (d'au moins 30 ans).	9
1.2	Emissions de GES et incertitudes	10
1.3	Modèle de circulation globale et modèle de circulation régionale.	11
1.4	Méthodologie de l'activité climatique	12
1.5	Régions disponibles dans l'initiative CORDEX couvrant l'île d'Hispaniola.	14
1.6	Exemple d'éléments d'une vérification visuelle pour la correction de biais d'un scénario d'ETP	17
1.7	Exemple d'éléments d'une vérification visuelle pour la correction de biais d'un scénario de précipitation	18
1.8	Précipitations et ETP annuelles dans le bassin du fleuve Artibonite pour la période actuelle et passée.	19
1.9	Cycles annuelles de précipitations et d'ETP au pas de temps mensuel.	20
1.10	Qualification des climats actuels et passés (précipitations et ETP).	21
1.11	Tendances climatiques dans le bassin de l'Artibonite.	21
1.12	Variations futures de l'ETP et des précipitations dans le bassin de l'Artibonite.	22
1.13	Évolution des précipitations extrêmes dans le bassin de l'Artibonite.	24
A.1	Région et sous-entités hydrographiques de l'Artibonite « R03 », telles que présentées dans CIAT (2010b) (gauche), et bassin de l'Artibonite (extrait de Frelat et al. (2012a))(droite).	26
A.2	Différences entre la région hydrographique R03, comme défini par CIAT (2010b) (gauche), et bassin de l'Artibonite (extrait de Frelat et al. (2012a))(droite).	26
A.3	Délimitations obtenues pour le bassin versant de l'Artibonite (haut) et des treize districts hydrographiques (bas).	28
A.4	Validation des données d'ETP de MEaSURES-RM-OBS : Mapping des valeurs de KGE (haut) pour toutes l'île de l'Hispaniola (gauche), et le bassin de l'Artibonite (droit). Un exemple de l'inadéquation entre les valeurs de Herrera and Ault (2017) (bleu) et celles de MEaSURES-RM-OBS (orange) est présenté (bas) pour un point de la grille.	30
A.5	Comparaison entre l'ETP de ERA5-Land et celle de Herrera and Ault (2017) : Mapping des valeurs de KGE (gauche) pour toutes l'île de l'Hispaniola (gauche), et le bassin de l'Artibonite (droit).	30
A.6	Validation des données d'ETP de ERA5-Land corrigé au pas de temps mensuel (1981-2009). En haut : mapping des valeurs de KGE pour l'Hispaniola (gauche), et le bassin de l'Artibonite (droit). En bas : exemple de valeurs de facteurs de corrections mensuels (pour un point spécifique de la grille).	31

# Liste des tableaux

1	Exutoires et superficies du bassin de l'Artibonite et des treize districts hydrographiques associés. . . . .	6
1.1	Liste des jeux de données spatialisées de précipitations disponibles pour la région des Caraïbes . . . . .	13
1.2	Liste des jeux de données spatialisées d'ETP disponibles pour la région des Caraïbes . . . . .	13
1.3	Jeux de données spatialisées d'ETP et de précipitations retenues comme données de référence. . . . .	14
1.4	Liste des simulations disponibles dans CORDEX. . . . .	15
A.1	Caractéristiques géographiques du bassin de l'Artibonite et des treize districts hydrographiques associés. . . .	27

## Contexte générale de l'étude

La République d'Haïti dispose de ressources en eau considérables (Emmanuel and Lindskog, 2000; Emmanuel, 2010). Pourtant, bien que jugée indispensable, la connaissance des bassins versants couvrant le pays reste faible (CIAT, 2010b).

La fragmentation institutionnelle et l'instabilité politique représentaient un frein aux connaissances scientifiques et au développement d'infrastructures. Toutefois, depuis le début des années 2010, le nombre croissant d'études portant sur les bassins versants haïtiens et leurs potentiels illustre les velléités des politiques haïtiennes à se saisir des questions environnementales et de développement. Cependant, les enjeux demeurent colossaux.

D'une part, si les aléas environnementaux sont bien présents (phénomènes cycloniques, inondations, sécheresses), ils sont amplifiés par la nature escarpée et complexe des terrains (Frelat et al., 2012a). D'autre part, la démographie croissante et ses besoins ont une influence significative sur l'environnement, notamment au travers de la déforestation et des changements d'occupation des sols. Aussi, les impacts potentiels des changements climatiques peuvent significativement modifier l'occurrence et l'intensité de ces dits aléas (Centella et al., 2008).

Afin d'anticiper les situations post-catastrophes, le gouvernement haïtien souhaite développer une approche programmatique et préventive au sein des sept régions hydrographiques qui composent la République d'Haïti (CIAT, 2010a). Aussi, définir des politiques de gestion, explorer le potentiel de développement, étudier les effets socio-économiques et environnementaux sont les clés d'une gestion intégrée à l'échelle d'un bassin.

Cette étude cherche à déterminer les impacts des changements climatiques sur la gestion et le développement de la plus grande région hydrographique de la République d'Haïti : le bassin versant de l'Artibonite. Ce bassin est transfrontalier et draine une superficie total 9 550 km<sup>2</sup> (dont 6 850 km<sup>2</sup> en Haïti et 2700km<sup>2</sup> en République Dominicaine). Si le barrage de Péligre (Haïti) est à ce jour la seule infrastructure majeure du bassin, le gouvernement dominicain souhaite construire trois barrages hydroélectriques dans la partie amont du bassin encore peu développée. Aussi, ces nouveaux équipements peuvent profondément perturber la gestion de l'eau sur l'ensemble du bassin et modifier les synergies et les conflits d'usages.

## Objectif général du projet

L'initiative présentée ici nous permettra de i) mesurer les contributions respectives des changements climatiques et des développements dans la partie amont du bassin à la vulnérabilité du secteur agricole dans la partie haïtienne, ii) d'évaluer la capacité d'adaptation du système hydrique de l'Artibonite aux changements climatiques et iii) d'évaluer les bénéfices pour le secteur agricole haïtien d'une gestion coordonnée des infrastructures hydrauliques dans les deux pays.

## Objectifs spécifiques

Pour atteindre cet objectif global, les objectifs spécifiques suivants ont été identifiés :

- Établir un diagnostic des conséquences attendues des changements climatiques sur les variables hydro-climatiques (précipitations et évapo-transpiration potentielle), notamment en constituant une base de données sur les projections climatiques (2020-2100).
- Déterminer les impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique de l'Artibonite et de ses affluents, en constituant une base de données sur les projections hydrologiques (2020-2100).
- Étudier les conflits d'usages dans le bassin, et quantifier la vulnérabilité des différents secteurs d'activité aux changements climatiques.

## Méthodologie générale de l'étude

La méthodologie proposée comporte trois activités, chacune répondant à un objectif spécifique. La figure 1 propose une représentation graphique de ces trois activités, ainsi que les étapes intermédiaires qui les constituent. Cette chaîne de modélisation peut être qualifiée de déterministe, ou d'approche « Top-Down », utilisant l'information des modèles climatiques afin d'obtenir des projections hydrologiques et ainsi forcer un modèle hydro-économique. Les trois activités sont les suivantes.

1. **L'activité climatique** (Figure 1, cerne bleue) : En premier lieu, nous nous focaliserons sur les climats actuels et passés. Pour cela, un état des lieux des observations météorologiques *in situ* sera établi (AC-1). En parallèle, nous dresserons un diagnostic portant sur la disponibilité des jeux de données spatialisés d'observations météorologiques (AC-2). En nous basant sur la littérature scientifique, les jeux de données spatialisés considérés comme les plus robustes seront sélectionnés (AC-3). Nous proposerons ensuite une validation des jeux de données spatialisées en effectuant une comparaison avec les observations *in situ* (AC-4). Ceci nous permettra de disposer d'une base de données de référence

afin de qualifier les climats actuels et passés. Dans un second temps, nous nous focaliserons sur les climats futurs. Nous constituerons une base de données comprenant les simulations climatiques d'intérêt pour la zone (AC-5). Puisqu'elles présentent de nombreux biais, ces simulations ne peuvent être utilisées *en l'état*. Aussi, une phase de pré-traitement des simulations (AC-6) sera réalisée, ainsi qu'une correction de biais (AC-7). À l'issue de ces travaux, nous disposerons d'un ensemble climatique, constitué de scénarios climatiques, nous permettant de quantifier les changements climatiques au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle.

2. **L'activité hydrologique** (Figure 1, cerne orange) : Afin de disposer d'un modèle hydrologique fonctionnel et spécifique au bassin de l'Artibonite, des observations hydrologiques sont nécessaires. Aussi, une première étape consistera à colliger ces observations (AH-1). Ces dernières, associées aux observations météorologiques spatialisées, nous permettent de calibrer et de valider le modèle hydrologique préalablement sélectionné (AH-2). Ayant un modèle hydrologique fonctionnel, nous serons alors en capacité d'utiliser les informations des scénarios climatiques afin de produire les projections hydrologiques (AH-3). Ces projections hydrologiques constitueront un ensemble permettant de quantifier l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie de l'Artibonite et de ses affluents.
3. **L'activité hydro-économique** (Figure 1, cerne verte) : Au cours de cette activité, nous concevons un modèle hydro-économique nous permettant de conceptualiser les relations économiques liant les différents acteurs du bassin de l'Artibonite. La conception d'un tel modèle requière de colliger un tout un ensemble de données hydro-économique tel que les acteurs, les usages, la valeur de l'eau, ... (AHE-1). Puis, nous explorerons différentes combinaisons de scénarios climatiques, hydrologiques, de politique de gestion et de développement du bassin afin de quantifier l'impact des changements climatiques sur la gestion de l'eau.

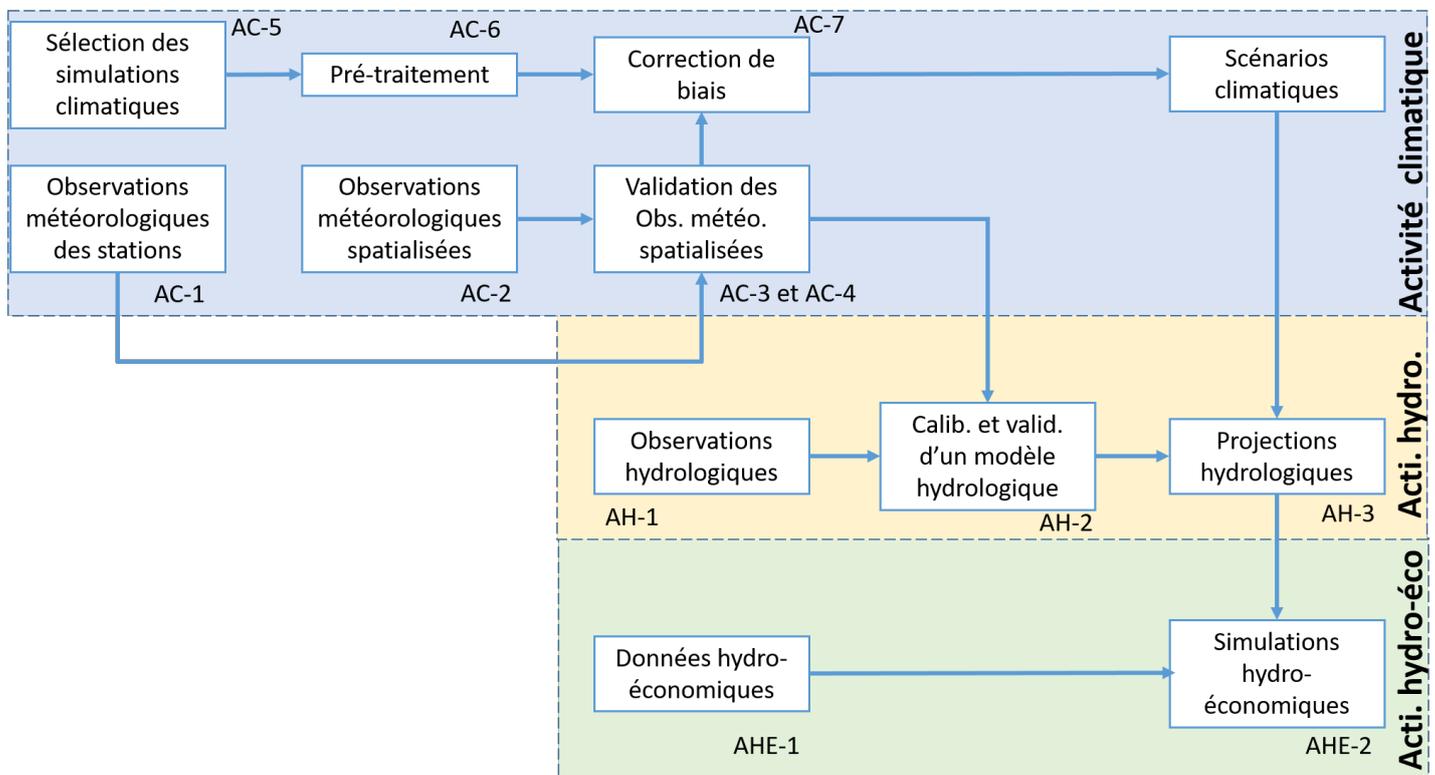


FIGURE 1 – Méthodologie générale du projet, divisée en trois activités (climatique, hydrologique et hydro-économique). Les acronymes AC, AH et AHE se réfèrent aux détails de l'activité climatique (AC), de l'activité hydrologique (AH), et de l'activité hydro-économique (AHE) respectivement.

## Choix des modèles et données associées

Le choix des modèles (climatiques, hydrologique et hydro-économique) est conditionné par l'objectif général de l'étude et par la disponibilité des données, notamment leur résolution spatiale et temporelle.

Une revue bibliographique a mis en avant que le bassin de l'Artibonite présente de forte hétérogénéité spatiale, ainsi que de nombreux microclimats. Ces éléments nous ont donc poussé à travailler avec des jeux de données disposant d'une résolution spatiale très fine. Par ailleurs, la taille du bassin et la nature escarpée des terrains induisent une réponse hydrologique rapide aux précipitations. Pour l'activité climatique et l'activité hydrologique, il est donc primordial de disposer de données

au pas de temps journalier. Cela nous permettra par la même occasion de représenter au mieux les phénomènes cycloniques et leurs impacts sur l’hydrologie du bassin.

L’aspect lacunaire des données hydro-climatiques dans le bassin de l’Artibonite proscrit l’emploi d’un modèle hydrologique distribué à base physique. Aussi, notre choix s’est orienté vers un modèle hydrologique conceptuel au pas de temps journalier requérant peu de données : le modèle hydrologique GR4J. Pour son fonctionnement, il nécessite des données journalières de précipitation et de l’évapotranspiration potentielle.

Au niveau climatique, l’enjeu est de représenter au mieux l’hétérogénéité spatiale du bassin et les phénomènes extrêmes. Comme les modèles climatiques de circulation générale (GCMs) ont une taille de maille trop grosse ( $\sim 200\text{km}$ ) pour représenter les processus méso-échelle et petite échelle, ils sont donc inadaptés aux besoins de notre étude. Par conséquent, nous avons sélectionné les projections climatiques à plus haute résolution spatiale des modèles climatiques régionaux (RCMs) de l’ensemble CORDEX. Ces produits sont davantage adaptés pour les études « VIA » (Vulnerability, Impacts and Adaptation)(Giorgi, 2019). Afin de satisfaire les besoins du modèle hydrologique GR4J, seules les données de précipitation et de l’évapotranspiration potentielle seront extraites.

## Le bassin versant de l’Artibonite et ses entités

Jusqu’en 2010, les limites et la nomenclature des entités hydrographiques citées dans la bibliographie (les rapports gouvernementaux ou les diverses études financées par les bailleurs de fonds internationaux) étaient très variables. Les rapports du CIAT (2010b), de Frelat et al. (2012a) et de Frelat et al. (2012b) ont permis de fixer des limites ainsi qu’une nomenclature normée aux différentes entités hydrographiques de la République d’Haïti.

Cette nomenclature est inspirée de la nomenclature américaine, et suit deux niveaux de hiérarchisation CIAT (2010b). À ce titre, notre étude se focalise sur la **région hydrographique de l’Artibonite** (« R03 »), elle-même divisée en onze districts hydrographiques (notés de « R03-D18 » à « R03-D28 »). Les limites de ces entités ainsi que leurs superficies sont présentées en figure 2 et en tableau 1. L’annexe A.1 présente le protocole et les données utilisées pour la délimitation de ces entités.

Noms	Latiutude (N)	Longitude (W)	Superficie $km^2$
R03	19.299	-72.7344	9365
R03-D18	19.299	-72.7344	789.5
R03-D19	19.165	-72.069	1085.8
R03-D20	19.167	-72.069	758.4
R03-D21	18.983	-71.87	805.9
R03-D22	19.047	-71.749	294.6
R03-D23	19.134	-71.638	679.9
R03-D24	19.2384	-72.7786	403
R03-D25	19.121	-72.498	1339.6
R03-D26	18.845	-72.089	532.2
R03-D27	18.901	-72.041	566.6
R03-D28	18.875	-71.901	256.8
R03-DS01	18.947	-71.871	1539.9
R03-DS02	18.983	-71.865	721

TABLE 1 – Exutoires et superficies du bassin de l’Artibonite et des treize districts hydrographiques associés.

## Organisation du rapport

Le rapport final de cette étude se divisera en trois chapitres :

- Le chapitre 1 se focalise sur les changements climatiques dans le bassin de l’Artibonite. Le livrable associé est une base de données comprenant les observations, les projections et les scénarios climatiques obtenus, ainsi qu’une notice explicative (produit 1). Ce chapitre reprend les services 1 à 3 tels que définis dans la LoA, à savoir :
  - Recenser et colliger les observations météorologiques ;
  - Recenser et colliger les simulations climatiques pour la région d’intérêt ;
  - Préparer les scénarios climatiques pour les horizons 2050 et 2090

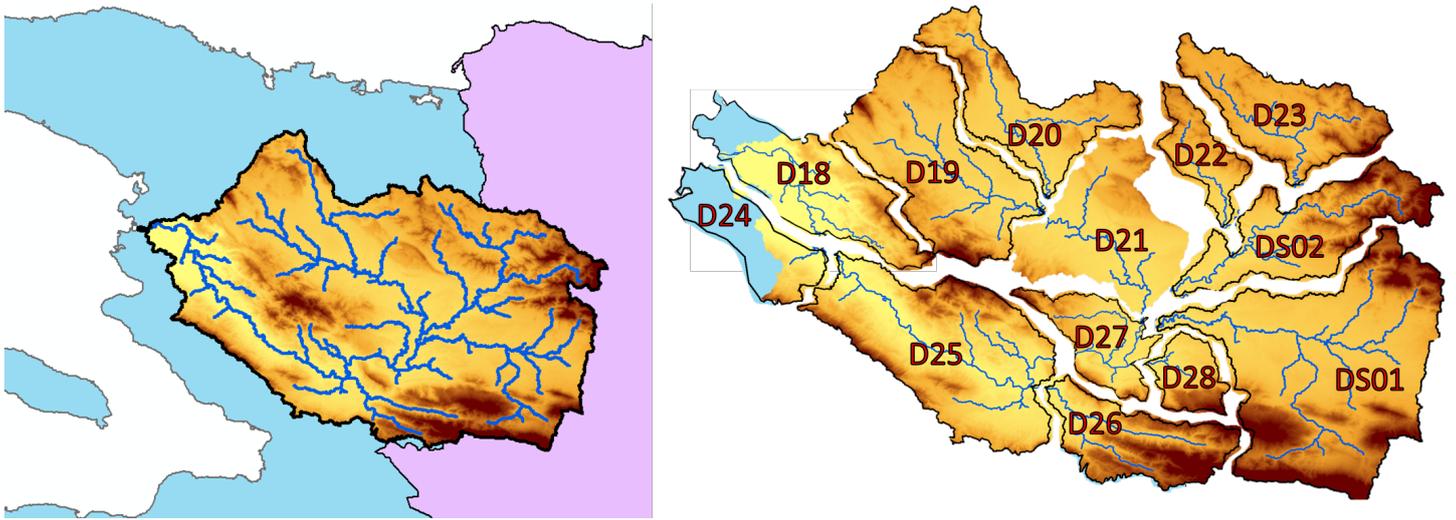


FIGURE 2 – Limite du bassin versant de l'Artibonite et des treize districts hydrographiques.

- Le chapitre 2 se focalise sur les projections hydrologiques dans le bassin de l'Artibonite. Les principaux livrables seront une base de données avec les observations et les projections hydrologiques et la notice explicative associée (produit 2). Ce chapitre reprend les services 4 et 5 tels que définis dans la LoA, à savoir :
  - Calibrer un modèle hydrologique pour le bassin de l'Artibonite;
  - Préparer les projections hydrologiques pour les horizons 2050 et 2090 à partir du modèle hydrologique et des scénarios climatiques.
- Le chapitre 3 présentera le produit 5, c'est à dire la gestion adaptée des ouvrages en climats futurs.

## Chapitre 1

# Changements climatiques dans le bassin de l'Artibonite

---

Réalisé par  
Etienne Guilpart  
Marc-André Bourgault, Amaury Tilmant

Dans le cadre projet FAO - SAGA  
Sécurité alimentaire : une agriculture adaptée

Département de génie civil et de génie des eaux  
Faculté des Sciences et de Génie  
Université Laval  
8 septembre 2021

---



## 1.1 Objectifs du chapitre et livrables

L'objectif de ce chapitre est de documenter l'évolution des variables hydro-climatiques du bassin versant de l'Artibonite (précipitations et évapotranspiration potentielle).

Le choix des données, la méthodologie et son application y sont détaillées avant d'aborder les tendances hydro-climatiques telles que prévues par les modèles climatiques.

À ce chapitre est associée une base de données comprenant les observations climatiques passées (utilisées comme données de référence), les simulations et les scénarios climatiques.

## 1.2 Changements climatiques : concepts et modélisation

### 1.2.1 Préambule

Dresser le portrait climatique d'une région consiste à décrire statistiquement le comportement de l'atmosphère ainsi que ses fluctuations en se basant sur de longues échelles temporelles (plusieurs décennies idéalement).

Un changement climatique est un changement significatif des propriétés statistiques d'une ou plusieurs variables climatiques (température, précipitation ...) à long terme. Cela peut se traduire par la présence d'une tendance à la hausse ou à la baisse par rapport aux conditions de références (Charron, 2016).

L'Organisation Mondiale de la Météorologie ainsi que l'American Meteorological Society ont fixé à trente ans la longueur nécessaire afin d'établir une norme climatique (Arguez and Vose, 2011). Étudier les changements climatiques revient donc à comparer les propriétés statistiques de variables climatiques entre deux périodes de trente ans. Si une période plus courte est utilisée, il est possible d'obtenir une mauvaise appréciation de la situation climatique (Figure 1.1).

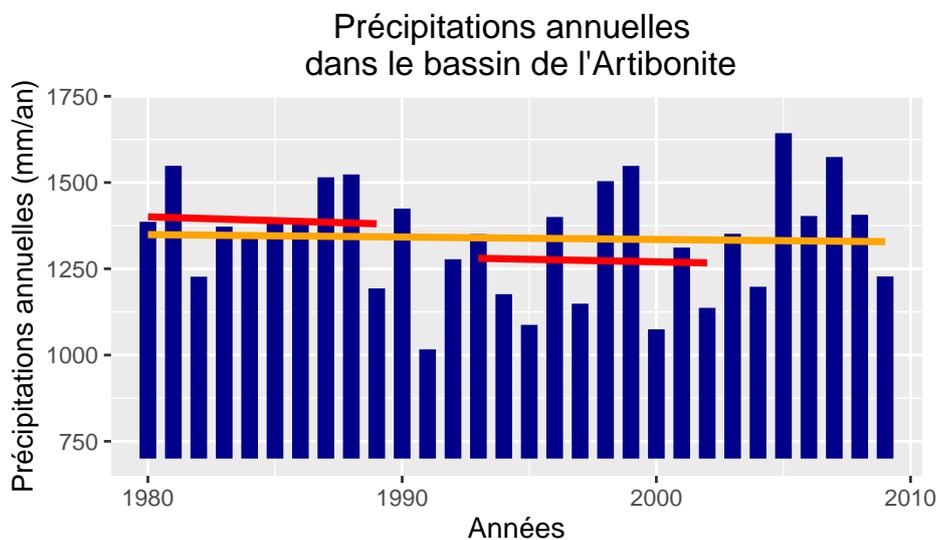


FIGURE 1.1 – Analyse montrant la tendance des données de précipitation issue de la base de données MSWEP. Il est important de disposer d'une période longue (30 années) pour définir une période climatique. Un exemple ici est donné : les précipitations annuelles sur le bassin de l'Artibonite sont présentées en bleu marine. Les segments rouges représentent la tendance sur deux périodes de 10 ans. Le segment orange représente la tendance sur 30 ans.

Dès lors, une étude portant sur les changements climatiques, telle que celle présentée ici, ne peut pas proposer de réponses précises à des questions déterministes, telle que "Quelle sera la quantité annuelle de précipitation pour l'année 2050 sur le bassin de l'Artibonite?". En revanche, il nous sera possible d'établir un diagnostic statistique des changements climatiques, et d'obtenir des éléments de réponse tel que "Pour l'horizon 2041-2070, il est attendu que les précipitations annuelles augmentent/diminuent de x% par rapport à la période de référence".

## 1.2.2 Climats passés, climats futurs

Les gaz à effet de serre (GES) et leurs concentrations sont des éléments clés dans l'évolution du climat (GIEC, 2014).

Les mesures des concentrations des GES et des variables climatiques (ex : températures, précipitations, vent, ...) jusqu'à nos jours ont permis de constituer des jeux de données qui se révèlent être indispensables pour la caractérisation des climats passés.

En revanche, les climats futurs vont dépendre des futures émissions de GES. Afin d'anticiper les trajectoires plausibles du climat, le GIEC<sup>1</sup> a défini des *RCP* (Representative Concentration Pathway) dans le but de tenir compte des incertitudes sur les émissions futures de GES. La figure 1.2 propose une représentation des incertitudes liées aux émissions de GES.

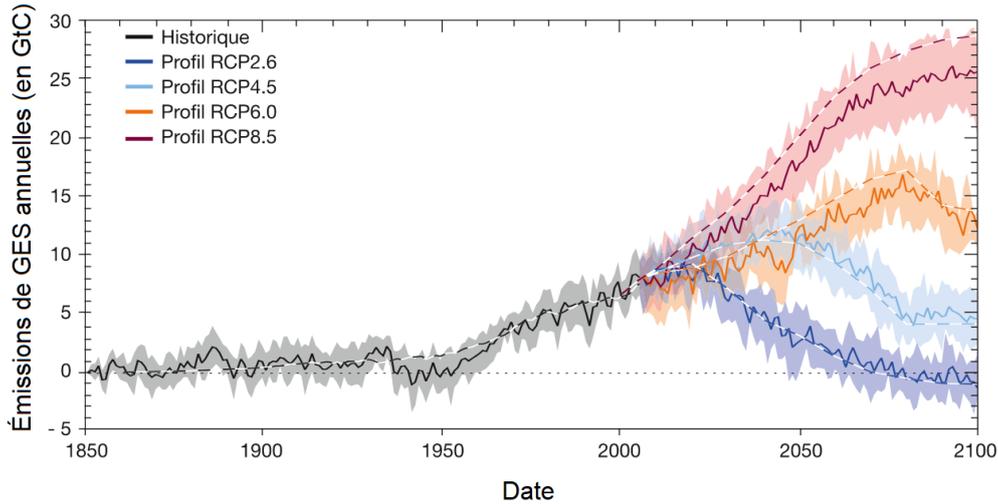


FIGURE 1.2 – Quelles émissions futures de GES ? L'incertitude sur les émissions est traitée via l'utilisation de 4 RCPs.

Puisque le futur n'est par définition pas actuellement observable, les scientifiques ont recours aux modèles climatiques afin de quantifier les évolutions possibles du climat et les incertitudes qui y sont associées.

## 1.2.3 Les modèles climatiques

Les modèles climatiques sont des outils numériques qui proposent une représentation mathématique et simplifiée des processus physiques du système climatique. Ils sont divisés en deux groupes :

- Les Modèles de Circulation Générale (MCGs), couvrant l'ensemble de la Terre, avec une résolution de l'ordre d'environ 200 km.
- Les Modèles de Circulation Régionale (MCRs), ne couvrant qu'une partie de la Terre, avec une résolution de l'ordre d'environ 50 km, ou moins. Les MCRs font partie des techniques de mise à l'échelle dynamique. Toutefois, un MCR ne peut fonctionner seul. Il doit être piloté aux frontières de son domaine par un MCG. On parle alors de couple MCG/MCR (Figure 1.3).

Il est à noter que les MCGs et MCRs peuvent simuler le climat à la fois sur les périodes passées (les modèles sont alors alimentés par des observations passées), et sur les périodes futures (les modèles sont alors alimentés par des scénarios, tels que les RCPs). Les simulations climatiques sont le produit final des MCGs et MCRs.

De nombreux modèles climatiques existent, ayant chacun leurs spécificités, leurs hypothèses de simplification, et leurs schémas internes. Cette diversité va générer des résultats sensiblement différents entre deux modèles, même si les données d'entrée sont identiques.

Les différents scénarios d'émissions de GES et la diversité des modèles climatiques sont les principaux responsables des incertitudes couvrant les climats futurs. C'est pourquoi il est recommandé de travailler avec le plus large ensemble de simulations climatiques possibles.

1. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais) : Organisme onusien ayant pour mission d'évaluer les changements climatiques et leurs implications sociétales.

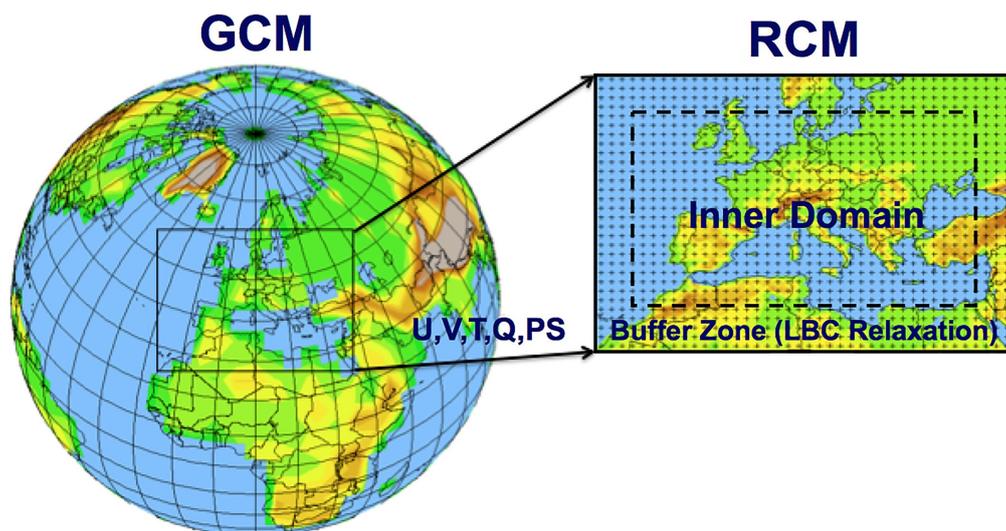


FIGURE 1.3 – Un MCG couvre l'ensemble de la planète, quand un MCR se focalise sur une région spécifique. Le MCR est "forcé" à ses frontières par un MCG.

#### 1.2.4 Des simulations climatiques aux scénarios climatiques

Le produit final des modèles climatiques sont les simulations climatiques. Le terme de *projection climatique* renvoie à la partie future d'une simulation (usuellement de 2006 à la fin du siècle<sup>2</sup>. L'adjectif *historique* renvoie à la partie passée d'une simulation (usuellement, les années antérieures à 2005 inclus).

Lorsqu'une comparaison entre la partie historique d'une simulation est effectuée avec des observations météorologiques, une différence significative est généralement constatée. Aussi, les simulations climatiques ne sont pas utilisables « en l'état » : elles présentent des biais. Avant de constituer un ensemble climatique, les simulations doivent être traitées. Cette phase est constituée de deux étapes :

- La phase de pré-traitement des simulations.
- La phase de post-traitement des simulations.

Le pré-traitement des simulations consiste à homogénéiser les simulations, spatialement et temporellement. Aussi, une interpolation spatiale est réalisée afin d'obtenir une grille identique à celle des observations météorologiques (utilisées lors du post-traitement). Puisque les calendriers des simulations ne sont pas identiques, une homogénéisation de ces derniers est aussi nécessaire. À l'issue du pré-traitement, les simulations sont prêtes pour la correction de biais (post-traitement).

La correction s'effectue en comparant la partie historique de la simulation avec des données d'observation. De cette comparaison, une fonction de transfert est créée, et son application sur l'ensemble de la simulation (historique et projection) permet d'éliminer les biais. Une simulation ainsi traitée devient un *scénario climatique*.

#### 1.2.5 Constitution d'un ensemble climatique

Fréquemment, la question du « meilleur scénario », ou du « scénario le plus fiable » est posée. Toutefois, il n'est pas possible d'isoler un scénario parmi les autres. En effet, tous les scénarios sont considérés comme équiprobables.

Du fait de la divergence des scénarios climatiques, il est nécessaire de constituer un ensemble de scénarios qui rendra compte des incertitudes sur le climat futur. Il est admis que plus le nombre de scénarios compris dans l'ensemble climatique est important, plus les incertitudes sont couvertes.

2. Dans son protocole, le projet d'inter-comparaison des modèles couplés (CMIP) a fixé la partie historique des simulations à la période 1850-2005, et la partie future des simulations à la période 2006-fin du XXI<sup>ème</sup> siècle (Taylor et al., 2012). Ce protocole est à la fois valable pour le projet CMIP5 et le projet CMIP6, qui servent de base aux cinquième rapport et au sixième rapport du GIEC respectivement.

### 1.3 Les changements climatiques dans le bassin de l'Artibonite : Méthodologie de l'activité climatique de l'étude

La méthodologie de l'activité climatique (AC) de cette étude suit les 7 étapes, notées de AC-1 à AC-7 (Figure 1.4) :

- Établir diagnostique sur la disponibilité des observations météorologiques *in-situ* (AC-1) et sur les jeux de données spatialisés d'observations météorologiques (AC-2).
- Sélectionner les jeux de données spatialisés considérés comme les plus robustes (AC-3), et en proposant une validation (AC-4).
- Sélectionner les simulations climatiques (AC-5), et y appliquer un pré-traitement (homogénéisation spatiale et temporelle) (AC-6).
- Appliquer une correction des biais des simulations en vue de produire les scénarios climatiques (AC-7).
- La constitution de bases de données climatiques et leurs mises en forme.

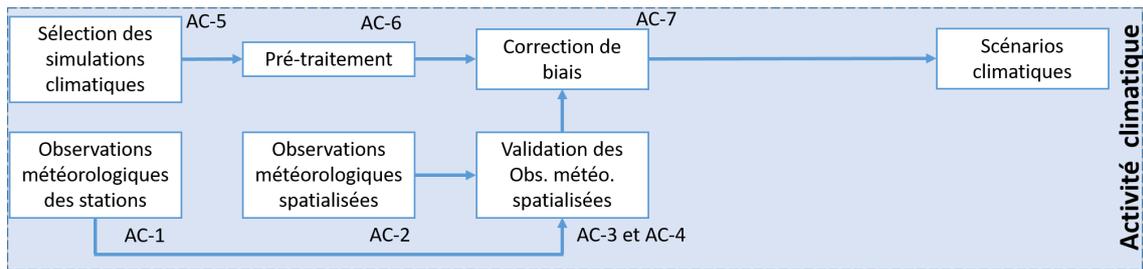


FIGURE 1.4 – Méthodologie de l'activité climatique en 7 étapes.

#### 1.3.1 Sélection des données d'observations météorologiques et validation (AC-1 à AC-4)

Comme souligné par Charron (2016), la qualité des scénarios climatiques est très dépendante de la qualité des jeux de données d'observations utilisés lors de la correction de biais.

Afin de bien représenter les nombreuses caractéristiques météorologiques du bassin (présences de phénomènes extrêmes, et microclimats), il est primordial de disposer de données aux pas de temps journalier. Toutefois, les observations *in situ* (provenant de stations) en Haïti sont lacunaires et difficilement accessibles.

Rappelons ici que l'activité hydrologique de cette étude nécessite des données de précipitation et de l'évapotranspiration potentielle. Aussi, seules ces deux variables seront traitées dans ce volet climatologique.

À défaut de disposer de données issues de stations, notre choix s'est porté sur des jeux de données spatialisés reconstitués. Le tableau 1.1 présente les jeux de données spatialisées de précipitations disponibles, et les informations inhérentes.

Parmi les jeux de données spatialisés disponibles, les données de précipitations de MSWEP ont été retenues. Puisqu'il n'est pas possible d'effectuer une validation avec des observations issues de stations météorologiques, ce jeu de données n'a pas été validé (à l'échelle journalière). Toutefois, les données de précipitations de MSWEP ont montré de très bonnes performances à l'échelle mensuelles, et se distinguent comme étant les plus fiables dans l'arc caribéen (Centella-artola et al., 2020).

D'ordre général, les mesures d'évapotranspiration potentielle (ETP) *in-situ* sont plutôt rares. Pour le cas précis de la République d'Haïti, aucune mesure d'ETP journalières n'est à ce jour disponible. En revanche, une revue de littérature a permis de mettre en avant que les jeux de données distribués d'ETP existants ont tous été reconstitués à partir de diverses équations dont les données d'entrée proviennent de réanalyses, d'observations satellites, et de stations météo. Une liste de ces jeux de données est présentée en tableau 1.2.

Dans leur publication, Herrera and Ault (2017) ont compilé les données d'un grand nombre de stations météorologiques dans l'arc caribéen, notamment de température. Un jeu de données spatialisées d'ETP a été conçu à partir de ces données, ainsi que des données satellites et de réanalyses. De par sa constitution, ce jeu de données apparaît comme étant le plus complet et le plus fiable pour la région (Herrera and Ault, 2017).

Toutefois, l'ETP de Herrera and Ault (2017) est au pas de temps mensuel. Puisque des données journalières sont requises, notre choix s'est porté sur un autre jeu de données. Parmi ceux présentés en tableau 1.2, trois sont potentiellement utilisables : MEASURES-RM-OB, ERA5-Land et CFSR-NCAR. Ce dernier a été écarté du fait de sa résolution spatiale (0.5 degré) qui

No	Abréviation	Sources	Résolution spatiale	Plage temporelle	Résolution temporelle
1	CRU	G	0.5 (land)	1901-2016	Monthly
2	CPCGlobal	G	0.5° (land)	1979-present	Daily
3	PRECL	G	0.5 (land)	1948-present	Monthly
4	GPCC05	G	0.5 (land)	1891-2016	Monthly
5	GPCC025	G	0.25 (land)	1891-2016	Monthly
6	HERREAUULT	G	0.033° (land)	1950-2017	Monthly
7	CHIRPS	G,S	0.05° (land)	1981-present	Monthly
8	PERSIANNCDR	G,S	0.25°	1983-present	Daily
9	TERRACLIMATE	G,R	0.0416 (land)	1958-2015	Monthly
10	CHELSA	G,R	0.0083° (land)	1979-2013	Monthly
11	CFSR	R	0.3125°	1979-2010	Hourly
12	ERAi	R	0.25°	1979-2017	Hourly
13	ERA5	R	0.25°	1979-present	Hourly
14	JRA55	R	0.56	1959-present	Daily
15	MSWEP	G,S,R	0.25° (land)	1979-2015	Hourly
16	MSWEP2	G,S,R	0.1° (land)	1979-2015	Hourly

TABLE 1.1 – Liste non exhaustive des jeux de données spatialisées de précipitations disponibles pour la région des Caraïbes. Les lettres G, S et R indiquent que les jeux de données ont été constitués via des observations issues de stations, de satellites, et de réanalyses respectivement.

No	Abréviation	Sources	Résolution spatiale	Plage temporelle	Résolution temporelle
1	CRU	G	0.5	1901-2020	Monthly
2	MEaSUREs-RM-OBS	G,R,S	0.25	1984-2006	3-hourly
3	ERA5-Land	R	0.1	1981 to present	Hourly
4	CFSR-NCAR	R	0.5	1979-2017	Daily
5	WATCH-UK CEH	R	0.5	1901-2001	Monthly
6	Herrera and Ault (2017)	G,R,S	0.03	1949-2017	Monthly

TABLE 1.2 – Liste non exhaustive des jeux de données spatialisées d’ETP disponibles pour la région des Caraïbes. Les lettres G, S et R indiquent que les jeux de données ont été constitués via des observations issues de stations, de satellites, et de réanalyses respectivement.

ne permet pas de représenter les variations à l'échelle locale. Afin de sélectionner l'un des deux jeux de données restant, nous avons effectué une comparaison entre les données de MEaSUREs-RM-OB et de Herrera and Ault (2017) d'une part, et celles de ERA5-Land et de Herrera and Ault (2017) d'autre part. Cette comparaison, qui consiste en une validation, est présentée en Annexe A.2. Il apparaît que ces deux jeux de données sont relativement éloignées de Herrera and Ault (2017), et ne peuvent être utilisés tel quel. Aussi, nous avons sélectionné les données de ERA5-Land (qui présente une meilleure résolution spatiale), auxquelles nous avons appliqué une correction mensuelle afin que le bilan mensuel d'ETP soit égal aux valeurs présentes dans Herrera and Ault (2017).

Aussi, les données de MSWEP et d'ERA5-land seront considérées dans cette étude comme les données de référence pour les précipitations et l'ETP respectivement (Table 1.3).

	Précipitation	ETP
Nom du jeu de données	MSWEP	ERA5-Land
Organisme	G-WADI, Univ. of Arizona	Copernicus
Source	Beck et al. (2019)	Muñoz-sabater et al. (2021)
Plage temporelle	1979-2020	1981-2020
Résolution temporelle	Journalier	Horaire
Résolution spatiale	0.1 degré	0.1 degré

TABLE 1.3 – Jeux de données spatialisées d'ETP et de précipitations retenues comme données de référence.

### 1.3.2 Sélection des simulations climatiques et les processus de pré-traitements (AC-5 et AC-6)

Les simulations des MCGs et les simulations des MRCs sont les seuls disponibles à ce jour. Les premières ont une résolution spatiale d'environ 200km, ce qui ne permet pas de représenter correctement les spécificités de terrains hétérogènes (Giorgi et al., 2009). Aussi, les simulations climatiques issues de l'initiative CORDEX représentent la meilleure alternative pour des études portant sur la vulnérabilité, les impacts et l'adaptation (VIA) aux changements climatiques (Giorgi and Gutowski, 2015; Giorgi, 2019).

Parmi les 14 régions de l'initiative CORDEX, deux couvrent l'île d'Hispaniola (Figure 1.5) : (i) la région 2 "Central America" (246.1 à 337.78 degré Est, -19.46 à 31.40 Nord), (ii) la région 3 "North America" (232.84 à 336.74 degré Est, 12.56 à 59.28 degré Nord).

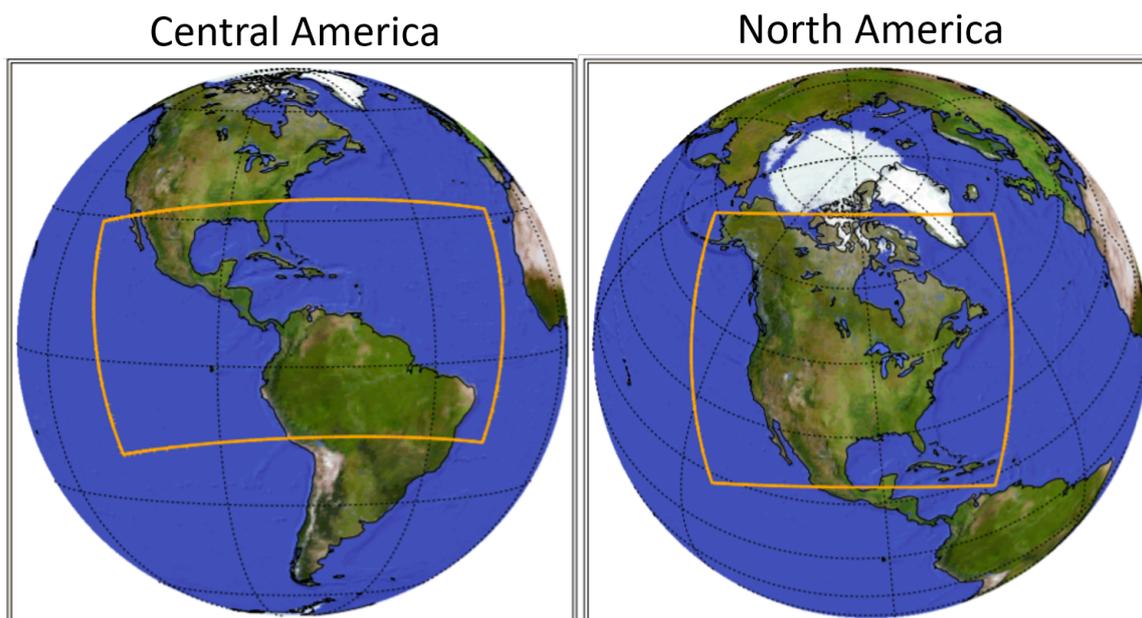


FIGURE 1.5 – Régions disponibles dans l'initiative CORDEX couvrant l'île d'Hispaniola.

Pour ces deux régions, deux résolutions spatiales sont disponibles (0.44 seconde d'arc, et 0.22 seconde d'arc, respecti-

vement 44km et 22km). Un diagnostic portant sur la quantité de simulation a été effectué. Aussi, nous avons à notre disposition 53 et 23 simulations climatiques pour les précipitations et l’ETP respectivement (Tableau 1.4).

Précipitations							
Domaine	Rés. spatiale	Rés. temporelle	Historique	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	Total
CAM-22	25km	Journalier	9	6	0	9	15
CAM-44	50km	Journalier	13	5	3	13	21
NAM-22	25km	Journalier	4	0	4	4	8
NAM-44	50km	Journalier	5	1	5	3	9
Total Simulation							<b>53</b>

Evapotranspiration potentielle							
Domaine	Rés. spatiale	Rés. temporelle	Historique	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	Total
CAM-44	50km	Journalier	10	5	3	10	18
NAM-44	50km	Journalier	2	1	2	2	5
Total Simulation							<b>23</b>

TABLE 1.4 – Liste des simulations disponibles dans CORDEX.

Les calendriers des simulations climatiques ne sont pas standardisés. Le calendrier le plus courant est le "calendrier-365 jours", pour lequel les jours supplémentaires des années bissextiles (29 février) sont ignorés. Nous avons décidé d’adopter ce calendrier comme étant le calendrier étalon. Aussi, les autres simulations présentant un calendrier différent ("360-jours" ou "grégorian") ont été ajustés (interpolation temporelle, ou suppression du 29 février respectivement).

Par ailleurs, la grille des simulations n’étant pas identique à celle des réanalyses, une étape d’interpolation spatiale a été effectuée (interpolation linéaire). Il est à noter que les simulations présentent un maillage plus large (0.44 ou 0.22 degré) que celle des réanalyses (0.1 degré). Dans ces conditions, effectuer une interpolation sous-entend une mise à l’échelle statistique des simulations.

À l’issue de ces étapes de pré-traitement, les simulations climatiques sont prêtes pour la correction de biais.

### 1.3.3 Production des scénarios climatiques : La correction de biais (AC-7)

#### Méthodologie du Quantile Mapping

La méthode de post-traitement sélectionnée pour la correction de biais est une correction par quantiles (« Quantile Mapping ») (Gennaretti et al., 2015; Mpelasoka and Chiew, 2009). Les simulations climatiques sont corrigée tour à tour. Pour une simulation donnée, la méthode du Quantile Mapping vise à corriger chaque point de la grille indépendamment des autres. Une comparaison est réalisée entre les données d’observation et les données de la partie historique de la simulation : une fonction de transfert est ainsi construite. L’application de cette dernière permet alors de corriger les biais de l’ensemble de la simulation (partie historique et projections de la simulation).

La correction de biais a été réalisée à l’échelle journalière. Les détails sont présentés ci-après. Pour une simulation donnée, et un point de la grille donné :

- Pour l’ETP, une séquence de 23 quantiles est définie (0.01, puis de 0.025 à 0.975 par incrément de 0.5, 0.98 et 0.99). Pour les précipitations, le quantiles 0.999 a été ajouté.
- Une première fonction de transfert est construite pour un jour de l’année spécifique (ex : le 1<sup>er</sup> janvier), en calculant les différences entre les quantiles  $q_{ref} - q_{sim}$  (corrections additives, pour l’ETP), ou en calculant les rapports des quantiles  $q_{ref}/q_{sim}$  (corrections multiplicatives, pour les précipitations). Les données prises en compte sont les données du jour de l’année spécifique, ainsi que ceux compris dans une fenêtre de trente jours (ex : pour construire la fonction de transfert du 1<sup>er</sup> janvier, les données des jours compris entre le 16 décembre et le 15 janvier, de toutes les années confondues, sont prises en compte).
- La construction des fonctions de transferts est répétée pour l’ensemble des 365 jours de l’année.
- Nous disposons de 365 fonctions de transfert, chacune constituée de 23 valeurs de corrections (ETP) ou 24 valeurs de corrections (précipitations). Nous appliquons ces fonctions de transferts au point de grille de la simulation traitée, et ce sur l’ensemble de la simulation (historique et projection).
- Les biais du point de la grille ainsi traité ont été supprimés.

Pour les précipitations, la partie commune du calendrier pour laquelle les fonctions de transfert seront créées s'étend du 02-01-1979 au 31-12-2005. Pour l'ETP, la plage commune du calendrier s'étend du 01-01-1981 au 31-12-2005.

### Vérification de la correction de biais

Il est important de conserver un point de vue critique lors de l'application de la correction de biais (Charron, 2016). Aussi, une vérification visuelle de la répartition des quantiles en fonction des jours de l'année a été réalisée.

Les données d'ETP ne présentent pas une large gamme de valeur (les données sont comprises entre 0 et 6 mm/j). Il n'y a pas de difficulté spécifique à appliquer une correction de biais additive dans de telles conditions. La période sur laquelle les facteurs de correction ont été calculés s'étend du 1981-01-01 au 2020-12-31. La figure 1.6 présente pour une simulation spécifique<sup>3</sup> les éléments de la vérification visuelle. Des figures homologues ont été générées pour l'ensemble des 23 simulations/scénarios climatiques, et sont jointes aux bases de données livrées.

Pour les précipitations, la situation est différente. La gamme de valeur est bien plus large (de 0 à plus 300 mm/j). Aussi, les facteurs de correction des quantiles peuvent présenter des valeurs "aberrantes" pour les extrêmes (notamment pour les très faibles précipitations, et les précipitations associées aux phénomènes cycloniques). Afin d'éviter tous artéfacts issus de la correction de biais, il a été fixé que les facteurs de correction des quantiles ne pouvaient excéder une valeur de 5. La période sur laquelle les facteurs de correction ont été calculé s'étend du 1979-01-02 au 2020-12-31. Similairement, la figure 1.7 présente pour une simulation spécifique<sup>4</sup> les éléments de la vérification visuelle. Des figures homologues ont été générées pour l'ensemble des 53 simulations/scénarios climatiques, et sont jointes aux bases de données livrées. Il est à noter que la correction de biais pour les faibles précipitations (quantiles inférieurs à 25%, correspondant le plus souvent à des précipitations inférieures à 1 mm/j) n'est pas d'aussi bonne qualité que pour des précipitations plus significatives. Toutefois, la contribution hydrologique de ce type de précipitations reste peu significative.

À l'issue de cette phase de vérification, aucun problème majeur n'a été détecté.

#### 1.3.4 Mise en forme

À l'instar des simulations climatiques, les scénarios climatiques forment une base de données dont les fichiers sont au format "netcdf". Aussi, la manipulation de ce type de fichier nécessite un logiciel de traitement statistique, comme R, Python ou Matlab. Deux exemples de code (en R et en Python) permettant d'extraire des données des scénarios climatiques sont présentés en annexe A.3.

Toutefois, afin de proposer une manipulation plus accessible des scénarios climatiques, des fichiers aux formats "txt" ont été créés. Ces fichiers contiennent les précipitations journalières moyennes et l'ETP journalier moyen pour le bassin versant de l'Artibonite (région hydrographique R03), ainsi que pour les districts hydrographiques inclus dans ce bassin versant.

La section suivante présente un descriptif des climats passés (ETP et précipitations), et détaille les trajectoires climatiques attendues.

## 1.4 Climatologie du bassin versant de l'Artibonite

Cette section présente les grandes caractéristiques climatiques (ETP et précipitations) du bassin versant de l'Artibonite.

### 1.4.1 Tendances climatiques passées

La figure 1.8 présente les précipitations et l'ETP à l'échelle annuelle dans le bassin versant de l'Artibonite.

Les précipitations annuelles peuvent fortement varier (de 950 mm/an en 2015, à 1650 mm/an en 2005). Aucune tendance monotone n'est discernable, ni à la hausse, ni à la baisse. En revanche, une alternance entre des périodes pluvieuses ou sèches peut être observée. Ce type d'alternance est commun à l'ensemble des Caraïbes (Herrera and Ault, 2017). Aussi, les années 1990-2000 et 2015-2020 apparaissent comme étant des périodes sèches, alors que les années 1980-1990 et 2005-2013

3. Il s'agit de la simulation "NAM-44.CCCma-CanESM2.rcp45.r1i1p1.SMHI-RCA4.v1.day"

4. Il s'agit de la simulation "CAM-44.MPI-M-MPI-ESM-LR.rcp85.r1i1p1.SMHI-RCA4.v1.day"

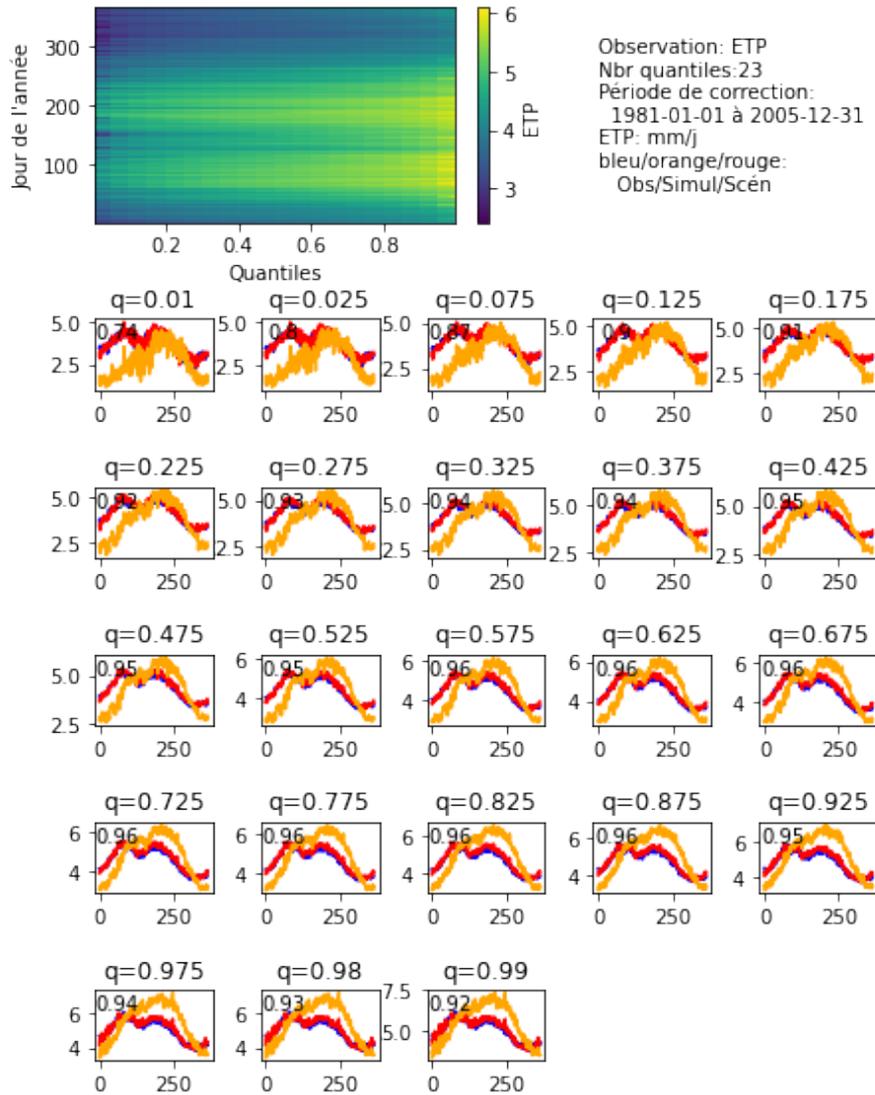


FIGURE 1.6 – Exemple d'éléments d'une vérification visuelle pour la correction de biais d'un scénario d'ETP. Le mapping de la valeur des facteurs de correction par quantiles et par jour (en haut à gauche) permet d'identifier la présence ou non de discontinuités dans la correction (ce qui pourrait mener tantôt des artefacts, tantôt des aberrations). Les 23 graphiques représentent les valeurs de précipitations par quantiles, en fonction du jour de l'année. La courbe bleue représente la référence (la cible), la courbe orange représente la simulation (qui doit être corrigée), et la courbe rouge représente le scénario (qui a subi la correction). Si la correction de biais est "parfaite", alors les courbes bleue et rouge se superposent. Le chiffre en haut à gauche de chacun des 23 graphiques donnent le coefficient de détermination ( $r^2$ ) entre les données de référence et celles du scénario.

pr\_CAM-44\_MPI-M-MPI-ESM-MR\_rcp85\_r1i1p1\_ICTP-RegCM4-3\_v4\_day.nc

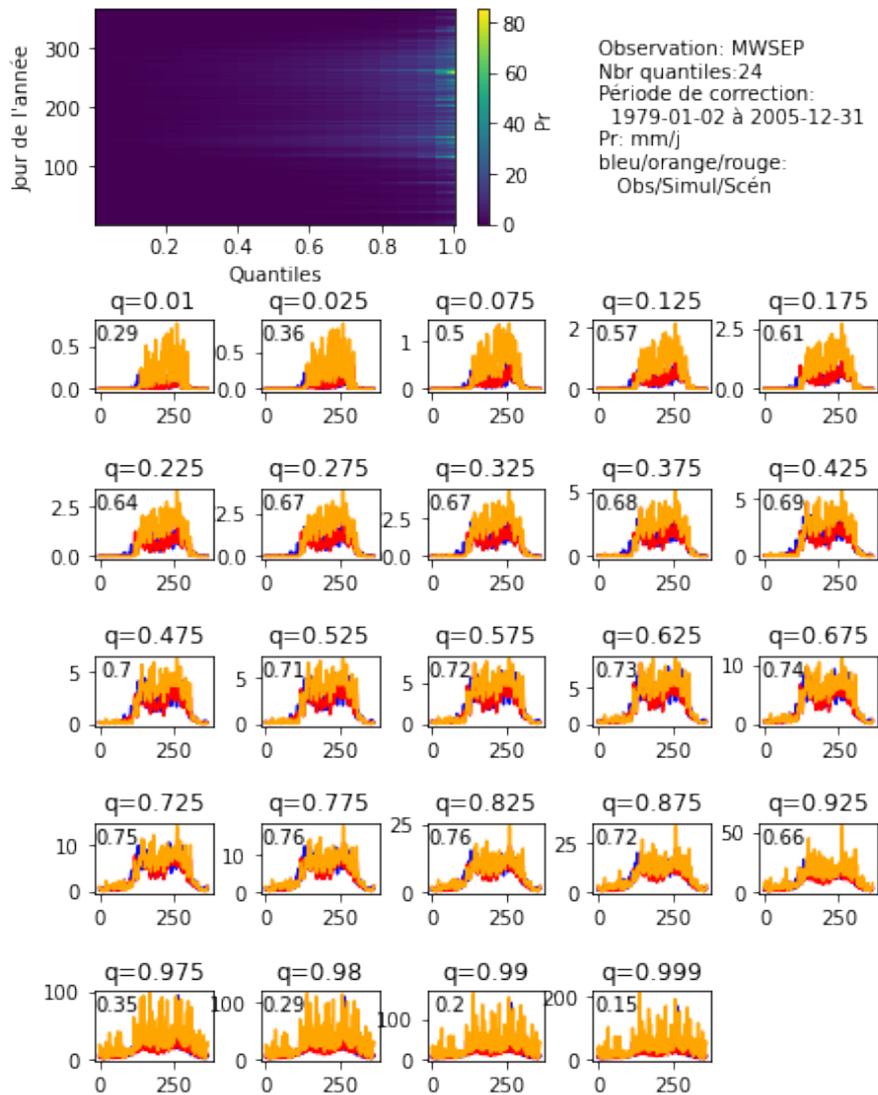


FIGURE 1.7 – Exemple d'éléments d'une vérification visuelle pour la correction de biais d'un scénario de précipitation. La légende est similaire à celle de la figure 1.6.

sont davantage humides.

L'ETP annuelle varie de 1580 mm/an à 1680 mm/an, et est relativement stable. Aucun cycle ou tendance pluriannuelle n'est observable. Les précipitations et l'ETP sont faiblement anti-corrélées à l'échelle annuelle (coefficient de corrélation : -0.37) . Aussi, les années pluvieuses sont marquées par de plus faibles taux d'évapotranspiration potentielle, et vice-versa.

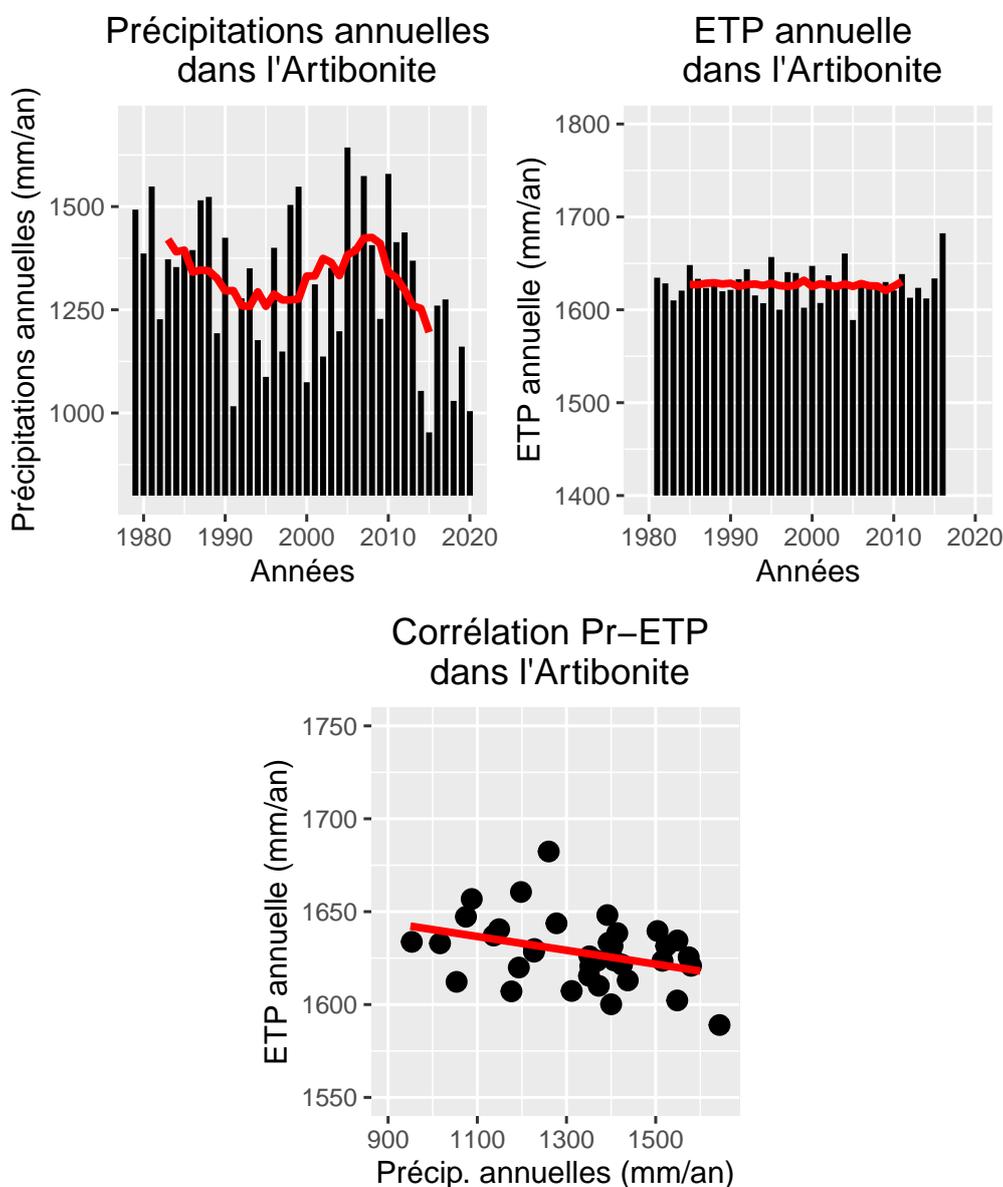


FIGURE 1.8 – Précipitations annuelles (haut gauche), ETP annuelle (haut droite) dans le bassin du fleuve Artibonite, et corrélation entre précipitations et ETP annuelles (bas). Les données sont extraites des jeux de données spatialisés de référence, à savoir MSWEP (précipitations) et ERA5-Land (ETP). La courbe en rouge représente tantôt la moyenne glissante à 10 ans (haut gauche et droite), tantôt la régression linéaire entre les précipitations et l'ETP ( $r^2=0.13$ ).

Les cycles annuels de précipitations et d'ETP au pas de temps mensuel sont présentés en figure 1.9.

Les précipitations mensuelles varient de 10 mm/mois à 210 mm/mois. Le cycle annuel des précipitations montre l'alternance entre deux grandes saisons. Une saison sèche de décembre à mars, et une saison humide de mai à novembre. Cette saisonnalité s'explique principalement par la migration de la zone de convergence inter-tropicale (ITZC) et ses conséquences sur les composantes climatiques régionales. L'ITZC amorce un déplacement vers le nord au début de l'été boréal, pour se fixer à une latitude d'environ 15°N, et qui se déplace à nouveau vers le sud à la fin de l'été boréal.

Pendant l'été boréal, l'intensification des phénomènes convectifs associés à l'ITZC est responsable de l'augmentation des précipitations. Le double pic de précipitations au mois de mai et de septembre/octobre est commun à toute la région des

Carraïbes (Granger, 1985), et est lié notamment à l'intensification de la cellule de haute pression de la mer des Sargasses et à la présence du jet caribéen. Durant l'hiver austral, l'ITCZ se fixe dans l'hémisphère sud, la République d'Haïti n'est plus sous l'influence des mouvements convectifs associés à l'ITCZ, et la saison sèche commence.

L'amplitude du cycle annuel d'ETP est moins marquée que celui des précipitations. Le minimum (maximum) est observé au mois de novembre (mars), avec un taux de 95 mm/mois (145 mm/mois). À l'échelle mensuelle, l'ETP et les précipitations sont très faiblement corrélés (coefficient égal à 0.24). Par conséquent, le cycle d'ETP doit être considéré comme indépendant de celui des précipitations.

Les mois de mars à août sont les mois où l'ETP est la plus forte (entre 125 et 145 mm/mois), alors que les mois d'octobre à février sont les moins évaporants (entre 95 et 125 mm/mois). Le mois de mai présente une chute d'ETP concomitante avec le pic de précipitations. Bien qu'elles ne soient que très faiblement corrélées, les précipitations semblent avoir une influence occasionnelle sur les taux d'ETP, spécifiquement visible au mois de juillet (coefficient de corrélation : -0.61).

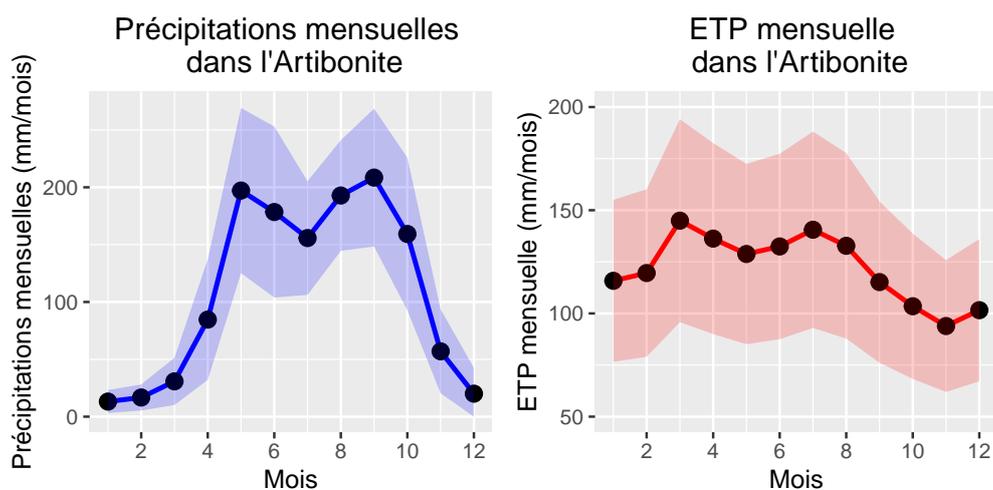


FIGURE 1.9 – Cycles annuels de précipitations (gauche) et d'ETP (droite) au pas de temps mensuel. Les ombres représentent l'écart-type autour de la moyenne. Les données sont extraites de MSWEP (précipitations, période : 1979-2020) et d'ERA5-Land (ETP, période 1981-2020).

La figure 1.10 présente les quantiles de précipitations (gauche) et d'ETP (droite) en fonction des jours de l'année.

Les quantiles de précipitations présentent le même cycle annuel que présenté en figure 1.9. Tout au long de l'année, la plupart des précipitations (quantile 25 et 50) sont très faibles (inférieures à 3.2 et 9 mm/j). En revanche, les précipitations intenses et extrêmes peuvent être observées au cours de la saison humide, notamment au cours des mois de mai, d'août et de septembre. Ces événements sont liés aux passages de phénomènes cycloniques dans le bassin.

Les quantiles d'ETP ne présentent pas tous le même cycle annuel. La répartition des quantiles au sein d'un même jour met en avant des variations d'ETP du simple au double. Cela souligne l'influence de la météorologie à l'effet synoptique.

## 1.4.2 Tendances climatiques futures

La figure 1.11 présente les tendances climatiques futures dans le bassin de l'Artibonite (R03) déterminées par notre ensemble de scénarios climatiques.

Les modèles climatiques montrent une forte divergence quant aux évolutions des précipitations et de l'ETP au cours du *XXI<sup>ème</sup>*. Cette divergence augmente à mesure que l'on s'approche de la fin du siècle. Afin de traiter ces évolutions climatiques, deux horizons de trente ans ont été définis :

- L'horizon 1, s'étendant de 2040 à 2069.
- L'horizon 2, s'étendant de 2070 à 2099.

Les pourcentages de variations de précipitations et d'ETP entre la période de référence (1976-2005) et les deux horizons sont mis en avant dans la figure 1.12.

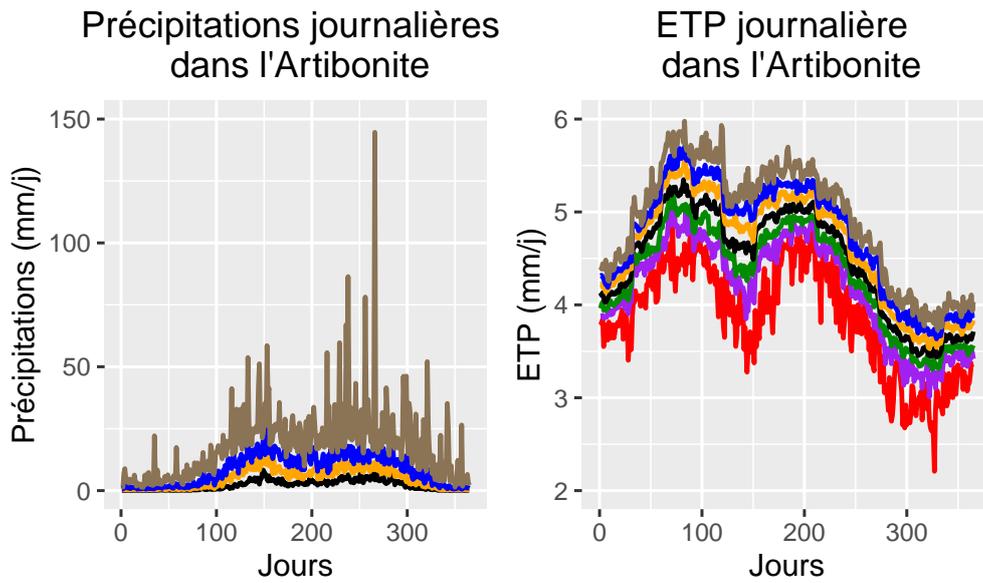


FIGURE 1.10 – Qualification des climats actuels et passés. Quantiles des précipitations par jour(gauche) et d’ETP (droite). Les couleurs des courbes font références aux quantiles : Marron :  $q_{99}$ , bleu :  $q_{90}$ , Orange :  $q_{75}$ , Noir :  $q_{50}$ , Rouge :  $q_{25}$ , Vert :  $q_{10}$ , Violet :  $q_1$ . Les données sont extraites de MSWEP (précipitations, période : 1979-2020) et d’ERA5-Land (ETP, période 1981-2020).

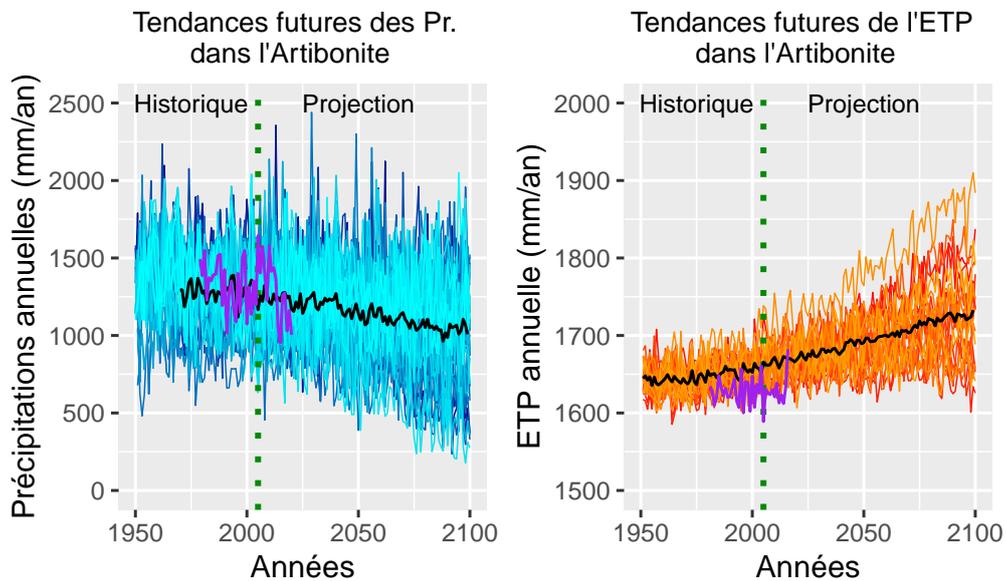


FIGURE 1.11 – À gauche : Tendances des précipitations annuelles dans le bassin de l’Artibonite pour les 53 scénarios de précipitations (lignes fines en bleus). À droite : Tendances de l’ETP annuelle dans le bassin de l’Artibonite pour les 23 scénarios d’ETP (lignes fines en rouge et orange). Les lignes noires représentent la moyenne des scénarios climatiques. Les lignes violettes représentent les valeurs annuelles des réanalyses utilisées comme référence (précipitations : MSWEP, ETP : ERA5-Land).

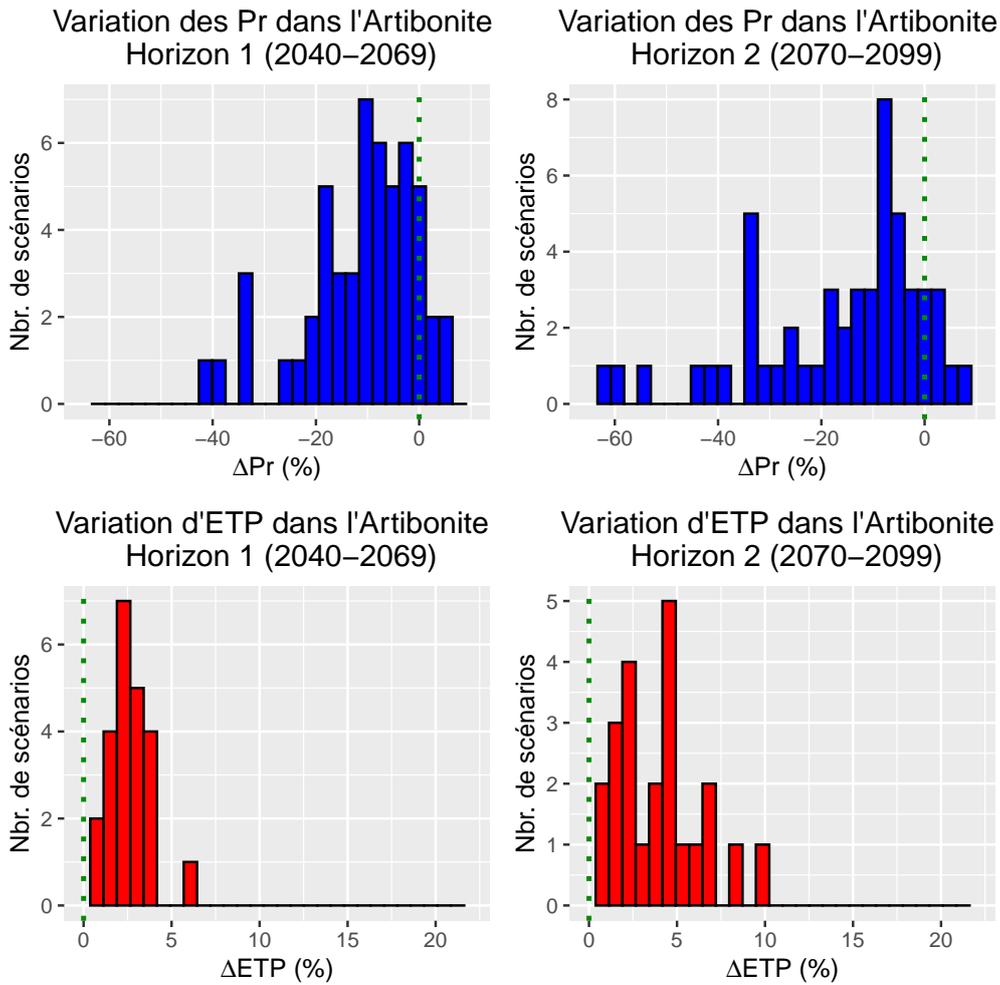


FIGURE 1.12 – Variations futures de l'ETP et des précipitations dans le bassin de l'Artibonite. À gauche : Pourcentage de variation entre la référence (1976-2005) et l'horizon 1 (2040-2069) pour les précipitations (haut) et l'ETP (bas). À droite : Pourcentage de variation entre la référence (1976-2005) et l'horizon 2 (2070-2099) pour les précipitations (haut) et l'ETP (bas).

## Situation climatique pour l'horizon 1

La majorité des modèles climatiques (47/53) prévoit une diminution des précipitations. Celles-ci peuvent être sensibles (22 modèles montrent une variation entre 0% et -10%), prononcées (16 modèles montrent une variation entre -10% et -20%), ou forte (9 modèles montrent une diminution supérieure à -20%). À titre de comparaison, une diminution des précipitations de -10% à -20% correspondrait à une pluviométrie similaire aux années 1994, 1995, 2009 et 2019, alors qu'une diminution supérieure à -20% correspondrait à une pluviométrie similaire aux années 2015 et 2018.

Par ailleurs, l'ensemble des 23 modèles climatiques montrent que l'horizon 1 aura des taux d'ETP supérieurs à ceux de référence. Cette augmentation serait comprise entre 0 et 5% (22 modèles sur 23), ou entre 5 et 10 % (1 modèle sur 23).

La conjonction d'une potentielle diminution des précipitations et d'augmentation de l'ETP fait de l'horizon 1 une période où l'aridité serait plus fréquente et plus prononcée que lors de la période 1976-2005.

## Situation climatique pour l'horizon 2

Si l'horizon 1 mettait en avant une diminution des précipitations, cette dernière serait encore plus prononcée pour l'horizon 2. La majorité des modèles climatiques (46/53) soulignent une diminution des précipitations, pouvant être sensible (19 modèles montrent une variation entre 0% et -10%), prononcée (9 modèles montrent une variation entre -10% et -20%), forte (12 modèles montrent une diminution de -20 à -40%), ou drastique (6 modèles montrent une diminution d'au delà de -40%). À titre de comparaison, une diminution comprise entre 0% et -10% correspond à une pluviométrie similaire aux années 1994, 1995, 2009 et 2019, une diminution comprise entre 10% et -20% aux années les plus sèches de bassin (2015 et 2018). Au-delà, le bassin n'aura jamais connu d'aussi faibles précipitations.

De plus, l'horizon 2 présente une augmentation d'ETP supérieure à celle de l'horizon 1. Cette augmentation serait contenue entre 0 et 5% (17 modèles sur 23), ou entre 5 et 10 % (6 modèles sur 23).

Aussi, l'horizon 2 serait un horizon davantage aride. Le futur climatique du bassin de l'Artibonite tendrait vers une aridité prononcée. Une aridité de cette ampleur aurait certainement des conséquences significatives sur le bilan hydrique du bassin ainsi que sur la gestion de l'eau.

### 1.4.3 Évolution des précipitations extrêmes

En préambule, il est important de rappeler que la représentation des extrêmes climatiques par les modèles climatiques reste fragile, et que les incertitudes associées sont importantes (Lopez-Cantu et al., 2020). De plus, comme expliqué en section 1.3.3, la correction de biais peut avoir un impact significatif sur les valeurs extrêmes. Aussi, les résultats concernant les précipitations extrêmes (présentés ci-après) sont intrinsèquement liés (i) à l'ensemble climatique utilisé, et (ii) aux techniques de corrections appliquées.

Les précipitations extrêmes sont amenées à évoluer au cours du *XXI<sup>me</sup>* siècle. La figure 1.13 présente cette évolution.

La définition de précipitations extrêmes correspond au quantile 99.9% des précipitations journalières (données de précipitations de MSWEP, entre le 2 janvier 1979 et le 30 décembre 2020) dans le bassin de l'Artibonite. Ce seuil correspond à 54.5mm/jour.

Pour chacun des 53 scénarios de précipitations, l'occurrence des précipitations extrêmes a été calculée pour l'horizon de référence (1976-2005), l'horizon 1 (2040-2069) et l'horizon 2 (2070-2099). De même l'intensité des précipitations extrêmes a été calculée.

Même si les scénarios climatiques montrent une diminution des précipitations annuelles (cf paragraphes précédents), l'occurrence des précipitations extrêmes tend à augmenter pour l'horizon 1 et l'horizon 2. En effet, si l'occurrence des précipitations extrêmes, tous scénarios confondus, atteignait 0.35 événement par an, cette dernière passe à 0.46 et 0.48 événement par an pour l'horizon 1 et l'horizon 2 respectivement. De même, il est attendu que l'intensité des précipitations augmente, passant de 73.0mm/j (horizon de référence), à 84.1mm/j (horizon 1) et à 83.3mm/j (horizon 2).

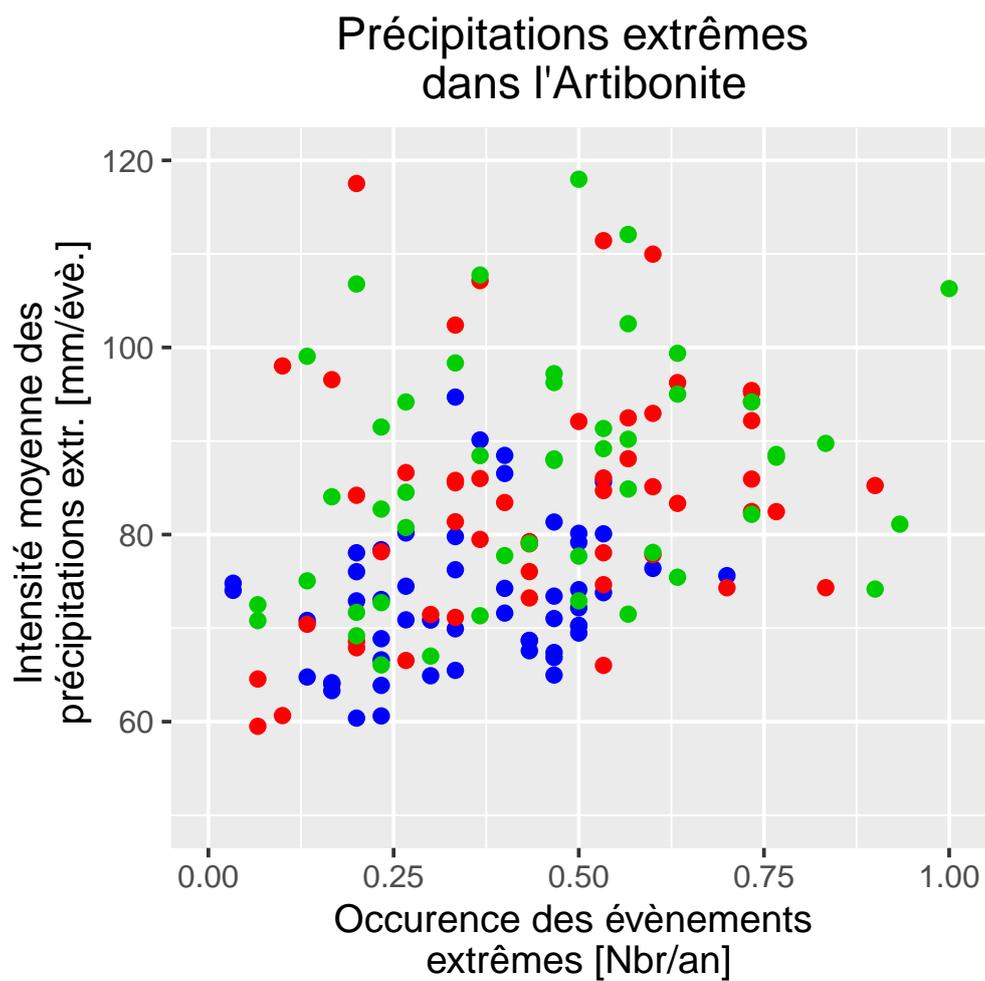


FIGURE 1.13 – Évolution des précipitations extrêmes dans le bassin de l'Artibonite. L'occurrence des précipitations extrêmes a été calculée comme le nombre de jours pour lesquels les précipitations excèdent le seuil de 54.5 mm/j, pour les 53 scénarios de précipitations. Les points bleus représentent l'horizon de référence (1976-2005), les points rouges l'horizon 1 (2040-2069) et les points verts l'horizon 2 (2070-2099).

# Annexe A

# Annexes

---

Réalisé par  
Etienne Guilpart  
Marc-André Bourgault, Amaury Tilmant

Dans le cadre projet FAO - SAGA  
Sécurité alimentaire : une agriculture adaptée

Département de génie civil et de génie des eaux  
Faculté des Sciences et de Génie  
Université Laval  
8 septembre 2021

---



## A.1 Délimitation des entités hydrographiques et protocoles

Les rapports du CIAT (2010b), de Frelat et al. (2012a) et de Frelat et al. (2012b) ont permis de fixer des limites ainsi qu'une nomenclature normée aux différentes entités hydrographiques de la République d'Haïti.

Le bassin de l'Artibonite correspond à la troisième région hydrographique, tout en étant la plus importante spatialement. La figure A.1 présente deux cartes. Celle de gauche correspond aux limites de la région hydrographique « R03 » et ces sous-entités, ou districts hydrographiques. Celle de droite présente le bassin versant de l'Artibonite (extraite de Frelat et al. (2012a)) .

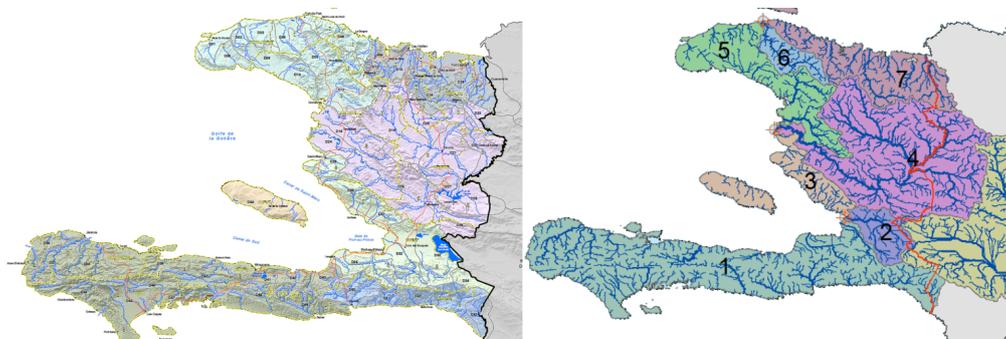


FIGURE A.1 – Région et sous-entités hydrographiques de l'Artibonite « R03 », telles que présentées dans CIAT (2010b) (gauche), et bassin de l'Artibonite (extrait de Frelat et al. (2012a))(droite).

Dans ces deux documents, la partie aval du bassin n'inclut pas les mêmes territoires. Le bassin drainé par la rivière Ester est inclus dans la région hydrographique de l'Artibonite, alors que, du point de vue hydrologique, il n'en fait pas partie (Figure A.2).

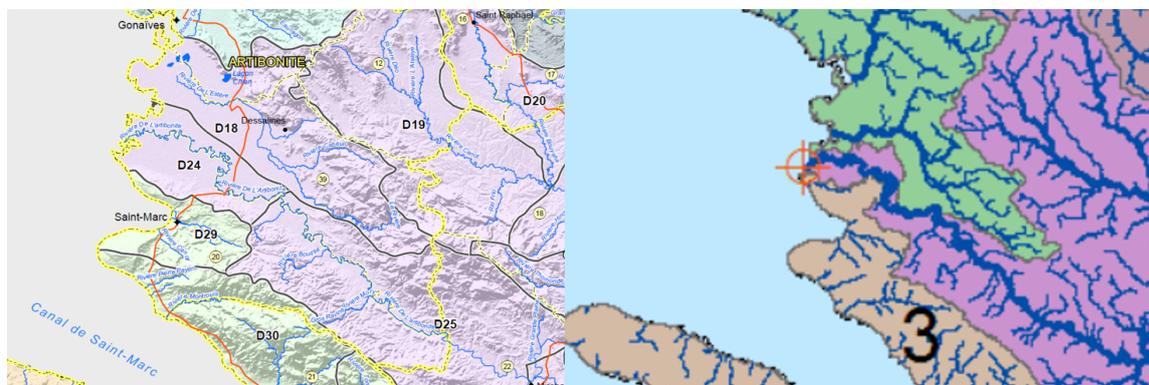


FIGURE A.2 – Différences entre la région hydrographique R03, comme défini par CIAT (2010b) (gauche), et bassin de l'Artibonite (extrait de Frelat et al. (2012a))(droite).

De plus, la nomenclature et les limites des districts hydrographiques se limitent à la partie Haïtienne du bassin. La partie Dominicaine n'est pas prise en compte.

Cela nous a conduit à réaliser un travail de délimitation du bassin et de ses sous-entités. Afin de capitaliser sur les études précédentes, notre délimitation cherche à respecter la division et la nomenclature normée présentée dans CIAT (2010b).

### A.1.1 Protocole de délimitation du bassin de l'Artibonite et de ses districts hydrographiques

Les données de la « Shuttle Radar Topography Mission » (SRTM) ont été utilisées comme données d'entrées. Ce jeu de données possède une résolution de 1 secondes d'arc, ce qui représente environ une maille de 30m de coté. Il a été retenu puisqu'il présente la meilleure résolution spatiale au niveau des Caraïbes. Ces données sont en libre service à l'URL suivante : <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Nous avons utilisé le logiciel Arc GIS dans sa version 10.4 et l'interface visuel Arc Map. Le protocole de délimitation est le suivant :

1. Les fichiers d'élévation sont fusionnés, via l'outil Windows>Image Analysis.

2. Pour assurer la continuité du réseau de drainage, l'outil Arctoolbox > Spatial Analyst tools > Hydrology > fill est utilisé.
3. Les directions de flux et l'accumulation sont déterminés grâce aux outils Flow direction et Flow Accumulation présents dans Arctoolbox > Spatial Analyst tools > Hydrology .
4. Le fichier d'accumulation de flux offre une représentation du réseau hydrographique obtenue via l'algorithme récursif.
5. Les exutoires du bassin et des sous entités sont déterminés visuellement sous Google-Earth, afin qu'ils correspondent à ceux présents dans CIAT (2010b). Puis, les coordonnées sont modifiées pour qu'elles se trouvent sur le réseau hydrographique défini par l'algorithme. Les coordonnées des exutoires sont données dans le tableau A.1.
6. Les limites du bassin et des sous-entités sont délimitées via l'outil Arctoolbox > Spatial Analyst tools > Hydrology > Watershed.
7. L'outil Arctoolbox>Outil de conversion>A partir d'un raster> Raster vers polygone permet de convertir le raster en shapefile, donnant ainsi un fichier de limite du BFS.

L'application de ce protocole nous a permis d'obtenir les limites du bassin de l'Artibonite ainsi que celles des treize districts hydrographiques. Leurs exutoires, leurs superficies et la nomenclature associée sont présentées en tableau A.1. Leurs limites sont données en figure A.3.

Nomenclature	Description	Coordonnées Google Maps		Coordonnées ArcGis		Superficie (km <sup>2</sup> )
		Latitude (N)	Longitude (W)	Latitude (N)	Longitude (W)	
R03	Draine l'ensemble du bassin de l'Artibonite	19.1264	-72.4871	19.299	-72.7344	9365
R03-D18	Draine la rivière Estère jusqu'à l'exutoire de l'Estère	19.1264	-72.4871	19.299	-72.7344	789.5
R03-D19	Draine la rivière Canot, jusqu'à la confluence avec la rivière Bouyaha	19.1642	-72.069	19.165	-72.069	1085.8
R03-D20	Draine la rivière Bouyaha, jusqu'à la confluence avec la rivière Canot	19.1644	-72.0696	19.167	-72.069	758.4
R03-D21	Draine la rivière Guayamou, jusqu'à la confluence avec la riv. Artibonite	18.982	-71.8683	18.983	-71.87	805.9
R03-D22	Draine la riv. Lociane jusqu'à la confluence avec l'Artibonite	19.0467	-71.7475	19.047	-71.749	294.6
R03-D23	Draine la riv. Libon et l'Artibonite jusqu'à la confluence avec la rivière Jonca	19.2297	-71.6341	19.134	-71.638	679.9
R03-D24	Draine de l'Artibonite de La Ville jusqu'à l'exutoire	19.2384	-72.7786	-	-	403
R03-D25	Draine l'Artibonite jusqu'au méandre de La Ville	-	-	19.121	-72.498	1339.6
R03-D26	Draine la riv. Fer à Cheval, jusqu'à la confluence avec l'Artibonite	18.8415	-72.098	18.845	-72.089	532.2
R03-D27	Draine le lac de Péligre, l'Artibonite, la riv. Thomonde, jusqu'au barrage de Péligre	18.9009	-72.04	18.901	-72.041	566.6
R03-D28	Draine la rivière Onde Verte jusqu'au lac de Péligre	18.8743	-71.8805	18.875	-71.901	256.8
R03-DS01	Draine la riv. Macasia juqu'a la confluence avec l'Artibonite	18.9421	-71.8822	18.947	-71.871	1539.9
R03-DS02	Draine la riv. Artibonite, jusqu'à la confluence avec Guayamou	18.9821	-71.8671	18.983	-71.865	721

TABLE A.1 – Caractéristiques géographiques du bassin de l'Artibonite et des treize districts hydrographiques associés.

Les limites présentées dans le rapport du CIAT (2010b) s'affranchissent des portions en République Dominicaine. Les limites déterminées ici inclues ces dernières. Aussi, les districts D22, D23 et D28 couvrent une surface plus importante. Par ailleurs, deux districts ont été ajoutés, nommés DS01 et DS02, et correspondent à des sous-entités présentes uniquement en République Dominicaine (Figure A.3).

Un artefact de calcul est présent à l'aval du district 26. Le réseau hydrographique déterminé par l'algorithme fusionne la rivière Artibonite et la rivière Estère. Des tests de « Stream burning » ont été réalisés (avec des altitudes de -1m, -5m et -10m), mais cela n'a pas permis d'améliorer la situation. Par conséquent, la délimitation des districts D18 et D24 a été réalisée manuellement, en se basant sur la délimitation du CIAT (2010b). La partie aval des limites du bassin en est aussi affectée. L'exutoire de l'Artibonite ne se situe pas à Grande Saline, mais à l'exutoire de l'Estère. Toutefois, nous estimons que cet artefact ne conduit qu'à une faible approximation d'un point de vu hydro-climatique, dont l'influence est négligeable sur les résultats. En effet, cette approximation ne concerne que trois points de la grille des données climatiques sur un ensemble de 81.

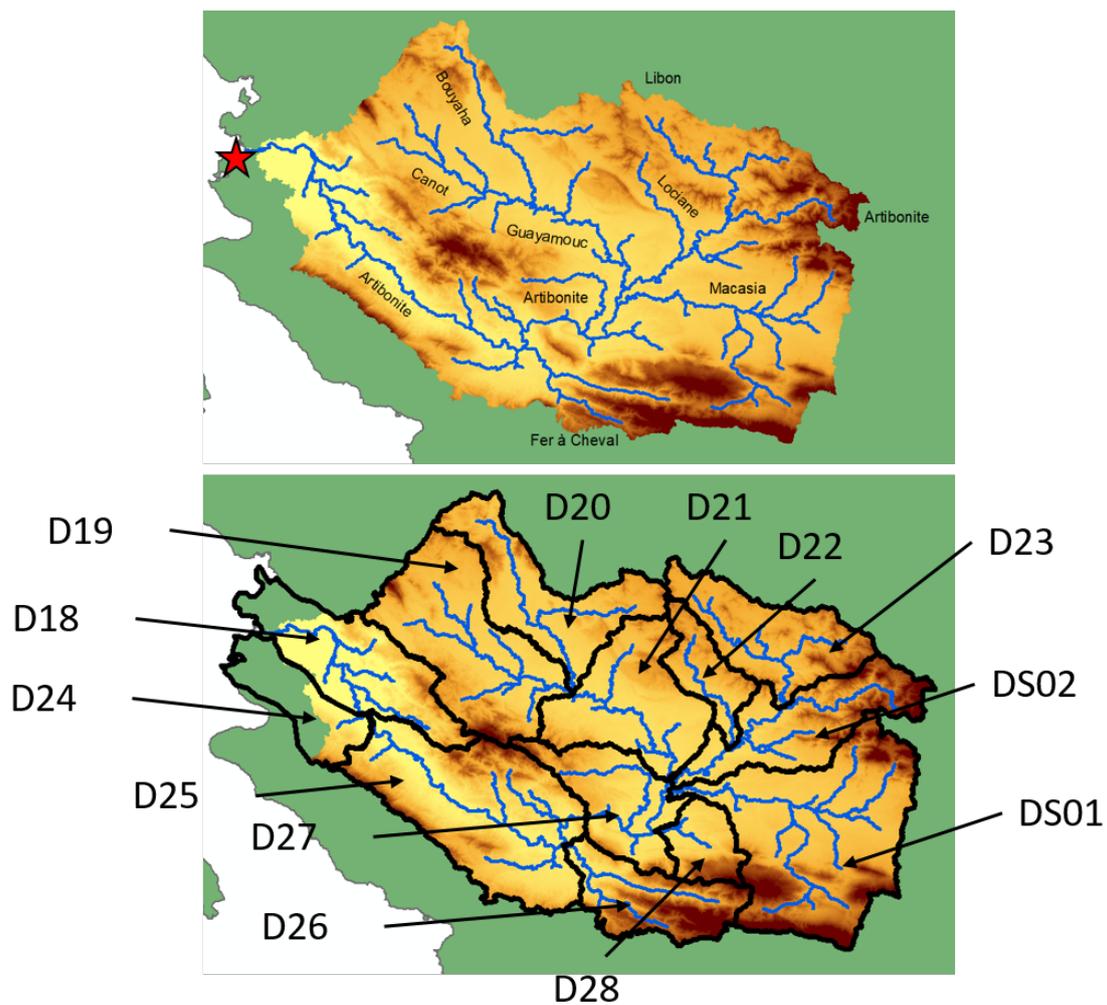


FIGURE A.3 – Délimitations obtenues pour le bassin versant de l'Artibonite (haut) et des treize districts hydrographiques (bas).

## A.2 Validation de l'ETP de ERA5-Land au pas de temps mensuel

Comme explicité au chapitre 1, aucun jeu de données d'observation in-situ d'ETP n'existe pour la République d'Haïti. Aussi, aucune validation de réanalyse d'ETP ne peut se faire au pas de temps journalier.

Toutefois, le jeu de données d'ETP conçu par Herrera and Ault (2017) est un jeu de données d'ETP mensuel, couvrant toute la région des Caraïbes. Ce jeu de données est constitué de valeur d'ETP principalement calculées via la formule de Penman-Monteith (Penman, 1948), en se basant sur des données d'observation in-situ, de réanalyses et de mesures satellites. A ce jour, ce jeu de données semble être le plus robuste dans les Caraïbes.

Une comparaison à l'échelle mensuelle des données d'ETP de ERA5-Land et de MEaSURES-RM-OBS avec les données de Herrera and Ault (2017) est ici présentée. Ces comparaisons se basent sur le critère de *Kling-Gupta Efficiency* (KGE) (Gupta et al., 2009). Le KGE a pour valeur optimale 1. Il est constitué de trois composantes :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (\text{A.1})$$

Avec  $r$ , le coefficient de corrélation entre l'évalué et la référence :

$$r = \frac{1}{n} \sum \frac{(X_i^{Ref} - \mu_{Ref})(X_i^{Eval} - \mu_{Eval})}{\sigma_{Ref}\sigma_{Eval}} \quad (\text{A.2})$$

Avec  $\beta$ , le bilan du modèle :

$$\beta = \frac{\mu_{Eval}}{\mu_{Ref}} \quad (\text{A.3})$$

Avec  $\alpha$ , le rapport des variances :

$$\alpha = \frac{\sigma_{Eval}}{\sigma_{Ref}} \quad (\text{A.4})$$

$\mu$  et  $\sigma$  faisant appel à la moyenne et à l'écart-type.

Le critère KGE a été calculé en chaque point de la grille.

### A.2.1 Comparaison entre l'ETP de MEaSURES-RM-OBS et de Herrera and Ault (2017)

Les données de Herrera and Ault (2017) ont été spatialement interpolées afin de disposer de la même grille que celle de MEaSURES-RM-OBS. La comparaison a été effectuée à l'échelle mensuelle, sur la période 1984-2006.

Globalement, les valeurs du KGE sont inférieures à 0.5, montrant une faible adéquation entre les données de MEaSURES-RM-OBS et de Herrera and Ault (2017) (Figure A.4). Un exemple est donné pour un point spécifique de la grille. Cette comparaison montre que les données de MEaSURES-RM-OBS ne peuvent pas être utilisées en l'état.

### A.2.2 Comparaison entre l'ETP de ERA5-Land et de Herrera and Ault (2017)

Les données de Herrera and Ault (2017) ont été spatialement interpolées afin de disposer de la même grille que celle de ERA5-Land. La comparaison a été effectuée à l'échelle mensuelle, sur la période 1981-2010.

Globalement, les valeurs du KGE sont médiocres (Figure A.5). Ici aussi, cette comparaison montre que les données de ERA5-Land ne peuvent pas être utilisées directement.

### A.2.3 Conclusions des comparaisons

En prenant le jeu de d'ETP de Herrera and Ault (2017) comme référence, il apparaît que ni ERA5-Land ni MEaSURES-RM-OBS ne peuvent être utilisés comme données d'ETP en l'état.

Aussi, une étape de correction des données est nécessaire afin que le bilan d'ETP soit respecté à l'échelle mensuelle. Nous avons appliqué cette correction aux données de ERA5-Land puisque ce jeu de données dispose d'une meilleure résolution spatiale.

Chaque point de la grille est corrigé indépendamment. La correction a consisté à déterminer un facteur de correction pour chacun mois, en calculant la différence entre l'ETP mensuel de ERA5-land et de Herrera and Ault (2017). Ensuite, ces

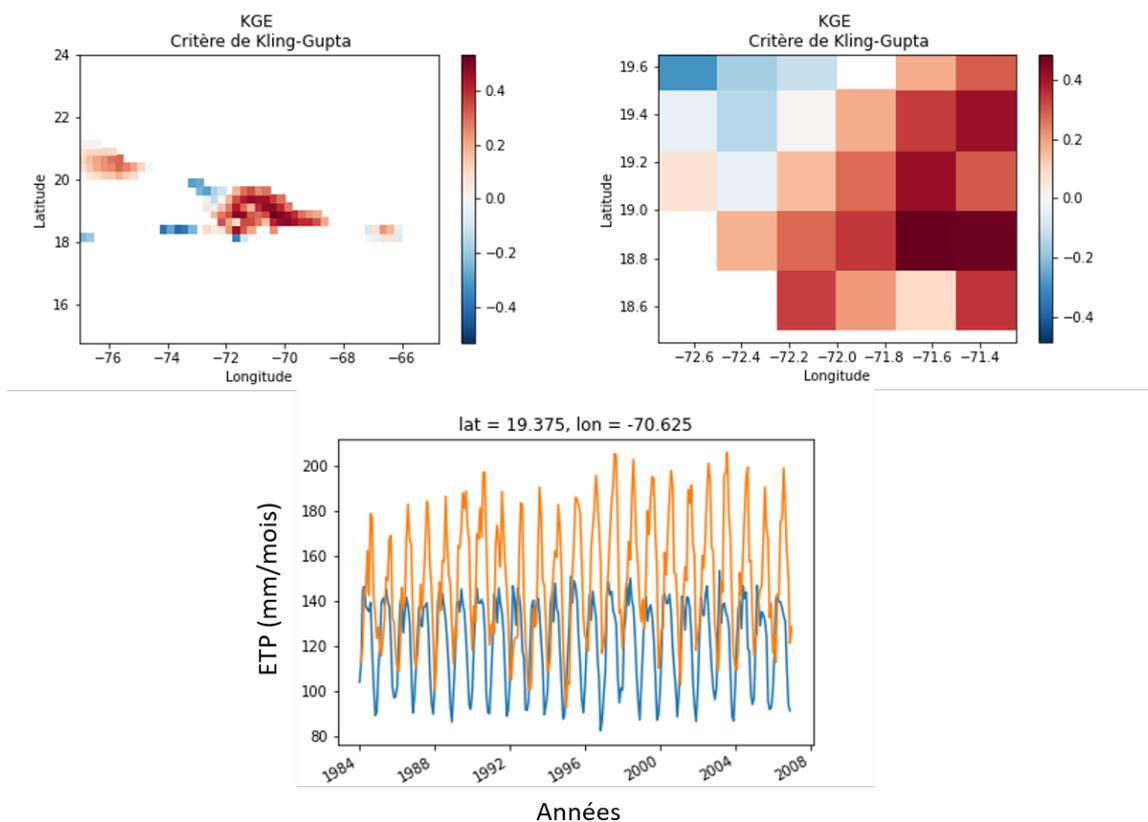


FIGURE A.4 – Validation des données d’ETP de MEaSUREs-RM-OBS : Mapping des valeurs de KGE (haut) pour toutes l’île de l’Hispaniola (gauche), et le bassin de l’Artibonite (droit). Un exemple de l’inadéquation entre les valeurs de Herrera and Ault (2017) (bleu) et celles de MEaSUREs-RM-OBS (orange) est présenté (bas) pour un point de la grille.

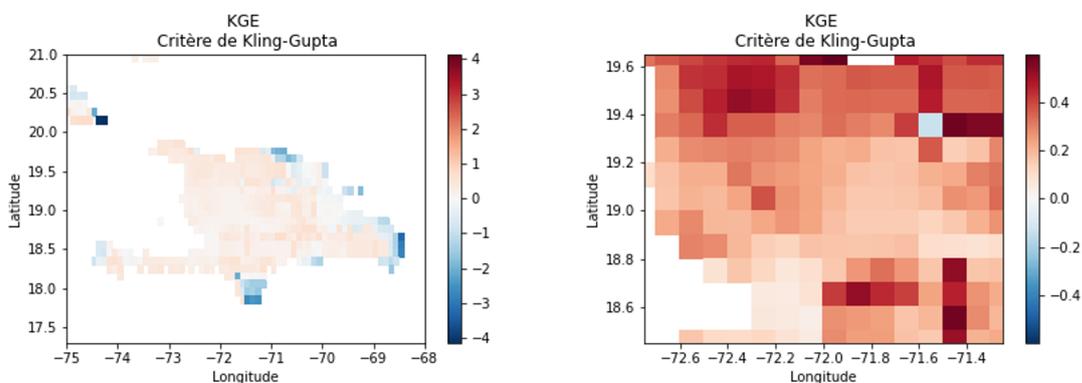


FIGURE A.5 – Comparaison entre l’ETP de ERA5-Land et celle de Herrera and Ault (2017) : Mapping des valeurs de KGE (gauche) pour toutes l’île de l’Hispaniola (gauche), et le bassin de l’Artibonite (droit).

facteurs de correction ont été appliqués aux données journalières de ERA5-Land, afin de produire un jeu de données d'ETP corrigé. Afin de vérifier l'efficacité de la correction, nous avons calculé à nouveau les KGE (Figure A.6) : le jeu de données ainsi corrigé présente d'excellente valeur de validation.

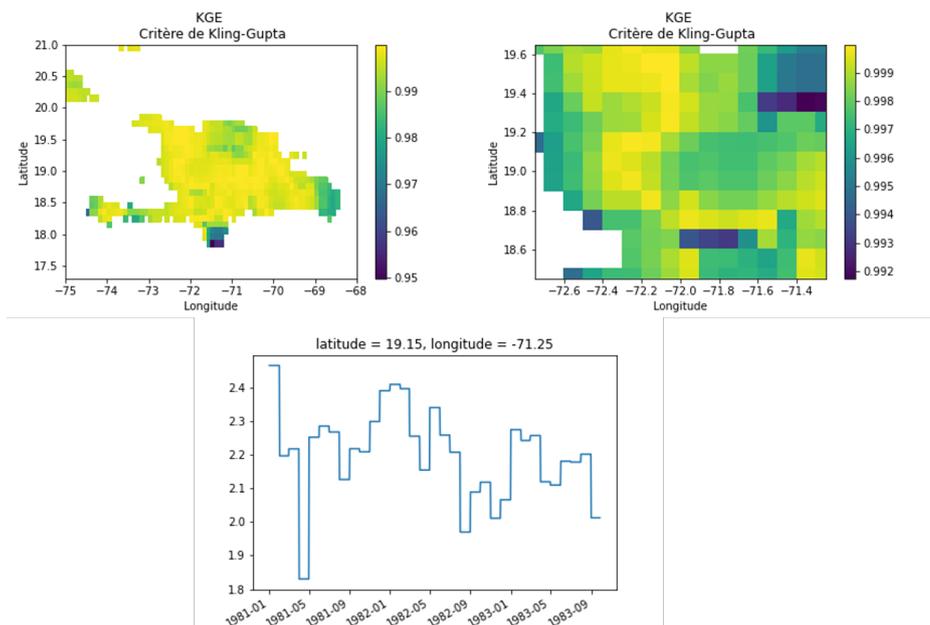


FIGURE A.6 – Validation des données d'ETP de ERA5-Land corrigé au pas de temps mensuel (1981-2009). En haut : mapping des valeurs de KGE pour l'Hispaniola (gauche), et le bassin de l'Artibonite (droit). En bas : exemple de valeurs de facteurs de corrections mensuels (pour un point spécifique de la grille).

## A.3 Exemples de codes pour l'extraction des données climatiques dans des fichiers "NetCDF"

Un fichier NetCDF (network Common Data Form) possède un format qui permet de stocker des variables (tel que la température, l'humidité, les précipitations ...) de manière multidimensionnelle (longitude, latitude, temps, ...). Aussi, ce format est le plus utilisé dans le domaine de la climatologie.

La manipulation des fichiers NetCDF requiert des logiciels de traitement statistique. Dans cette annexe, nous présentons des exemples simples de code sous *R* et sous *Python* pour l'extraction des données climatiques.

### A.3.1 Exemple de code sous *R*

Pour pointer vers le dossier contenant le fichier netcdf

```
setwd("../") # Ou ... est le chemin d'accès
```

Pour la lecture du fichier netcdf

```
Data=nc_open(filename = "fichier.nc") #Permet d'ouvrir le fichier
# Extrait la variable ciblée (ici 'ETP')
Data_ETP=ncvar_get(nc = Data, varid = "ETP" )
# Extrait la dimension ciblée (ici la longitude)
Data_lon=ncvar_get(nc = Data, varid = "lon" )
# Extrait la dimension ciblée (ici la latitude)
Data_lat=ncvar_get(nc = Data, varid = "lat" )
# Extrait la dimension ciblée (ici le temps)
Data_time=ncvar_get(nc = ERA, varid = "time" )
```

Pour l'extraction de données en un point de la grille :

```
# Permet d'extraire la donnée de coordonnées Longitude=Data_lon[1]
#Latitude=Data_lat[3]; Temps= Data_time[5]
Data_ETP[1,3,5]
```

Pour l'extraction de données en plusieurs points de la grille :

```
# Pour se focaliser sur une longitude donnée
Indice_lon=which(Data_lon> -73 & Data_lon< -72)
# Pour se focaliser sur une latitude donnée
Indice_lat=which(Data_lat> 18.5 & Data_lat< 19.5)
# Pour se focaliser sur une fenêtre temporelle (ici 365 jours contigus)
Indice_temps=[1:365]
```

### A.3.2 Exemple de code sous *Python*

Importation des packages requis

```
import xarray as xr
import numpy as np
import glob
```

Pour pointer vers le dossier contenant le fichier netcdf

```
files=glob.glob("../fichier.nc")# Ou ... est le chemin d'accès
```

Pour la lecture du fichier netcdf

```
Data=xr.open_dataset(files]) #Permet d'ouvrir le fichier
```

Pour l'extraction de données en un point de la grille :

```
# Ou "ETP" est la variable désirée. "time", "lat" et "lon"
# réfèrent indices des coordonnées souhaitées, telles que
# contenues dans Data.time, Data.lat et Data.lon respectivement.
Data.ETP[time, lat, lon]
```

Pour l'extraction de données en plusieurs points de la grille :

```
# Permet d'extraire les données contenues entre une longitude de
-73 et -71 degré; et entre une latitude de 18 et 19 degré.
Indice_lon=np.logical_and( Data.lon.values> -73 , Data.lon.values<= -71)
Indice_lat=np.logical_and( Data.lat.values> 18 , Data.lat.values<= 19)
Obs=Obs.isel(lon=Bool_ind_lon, lat=Bool_ind_lat)
```

# Bibliographie

- Arguez, A. and Vose, R. R. (2011). The Definition of the Standard WMO Climate Normal. *American meteorological society*, (June) :699–704.
- Beck, H. e., Wood, E. F., Pan, M., Fisher, C. k., Miralles, D. g., van Dijk, A. i. j. M., Mcvicar, T. r., and Adler, R. F. (2019). MSWEP V2 GLOBAL 3-hourly 0.1° precipitation Methodology and Quantitative Assessment. *American meteorological society*, (March) :473–500.
- Centella, a., Bezanilla, a., and Leslie, K. (2008). A study of the uncertainty in future Caribbean climate using the PRECIS regional climate model. *Caribbean Community Climate Change Centre, Technical Report*, (January 2018) :16.
- Centella-artola, A., Bezanilla-morlot, A., Taylor, M. A., Herrera, D. A., Martinez-castro, D., Gouirand, I., Sierra-lorenzo, M., Vichot-llano, A., Stephenson, T., Fonseca, C., Campbell, J., and Alpizar, M. (2020). Evaluation of Sixteen Gridded Precipitation Datasets over the Caribbean Region Using Gauge Observations. *Atmosphere*, 11 :1334.
- Charron, I. (2016). *Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation*. 2016 edition.
- CIAT (2010a). Haïti : Vers une Gestion Intégrée des Bassins Versants. Technical report, Comité Interministériel de l'Aménagement du Territoire d'Haïti (CIAT), République d'Haïti.
- CIAT (2010b). La Gestion intégrée des bassins versants en Haïti - Méthodologie de délimitation cartographique des bassins versants. Technical report, LGL S.A. - SNC Lavalin, République d'Haïti.
- Emmanuel, E. (2010). Pour une gestion intégrée des ressources en eau en Haïti. Technical report, Pétion-Ville, Haïti.
- Emmanuel, E. and Lindskog, P. (2000). Regards sur la situation des ressources en eau de la République D'Haïti. Technical report, UNESCO.
- Frelat, R., Claden, M., Bendraoua, F., Hage, M. E., Polidori, L., and Gaucherel, C. (2012a). Projet de Bassin versants en Haïti - Phase I : Description spatiale des bassins versants Haïtiens. Technical Report May 2015, Institut Français de Pondichéry, Pondichery.
- Frelat, R., Salomon, L., Rouy, B., Hage, M. E., Cudennec, C., and Gaucherel, C. (2012b). Projet de Bassin versants en Haïti - Phase II : Caractérisation spatiale des bassins versants Haïtiens. Technical Report May 2015, Institut Français de Pondichéry, Pondichery.
- Gennaretti, F., Sangelantoni, L., and Grenier, P. (2015). Toward daily climate scenarios for Canadian Arctic coastal zones with more realistic temperature- precipitation interdependence. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres RESEARCH*, 11(862).
- GIEC (2014). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*.
- Giorgi, F. (2019). Thirty Years of Regional Climate Modeling : Where Are We and Where Are We Going next ? *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 124(11) :5696–5723.
- Giorgi, F. and Gutowski, W. J. (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(July) :467–490.
- Giorgi, F., Jones, C., and Asrar, G. (2009). Addressing climate information needs at the regional level : the CORDEX framework. . . . *Organization (WMO) Bulletin*, 58(July) :175–183.
- Granger, O. E. (1985). Caribbean climates. *Progress in Physical Geography*, 9(1) :16–43.
- Gupta, H. V., Kling', H., Yilmaz, K. K., and Martinez-Baquero, G. F. (2009). Decomposition of the Mean Squared Error & NSE Performance Criteria : Implications for Improving Hydrological Modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2) :80–91.

- Herrera, D. and Ault, T. (2017). Insights from a new high-resolution drought Atlas for the Caribbean spanning 1950-2016. *Journal of Climate*, 30(19) :7801–7825.
- Lopez-Cantu, T., Prein, A. F., and Samaras, C. (2020). Uncertainties in Future U.S. Extreme Precipitation From Downscaled Climate Projections. *Geophysical Research Letters*, 47(9) :1–11.
- Mpelasoka, F. S. and Chiew, F. H. (2009). Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections. *Journal of Hydrometeorology*, 10(5) :1168–1183.
- Muñoz-sabater, J., Dutra, E., Agustí-panareda, A., Albergel, C., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., and Rodríguez-fernández, N. J. (2021). ERA5-Land : A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, (January 2020) :1–50.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London*, 193 :120–145.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4) :485–498.